

---

**Schallleistungsgerechte Bewertung von  
Schwingformen flächiger Strukturen**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Johannes Tschesche**

aus Gießen

|                             |                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Berichterstatter:           | Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz          |
| Mitberichterstatter:        | Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer |
| Tag der Einreichung:        | 09.04.2018                          |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 29.05.2018                          |

Darmstadt 2018

D17

---

---

Johannes Tschesche: Schallleistungsgerechte Bewertung  
von Schwingformen flächiger Strukturen  
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,  
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2019  
Tag der mündlichen Prüfung: 29. Mai 2018

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-86029

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/8602>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Creative Commons, Namensnennung, nicht kommerziell, keine Bearbeitung  
4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

---

---

---

## Kurzfassung

---

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Berücksichtigung der abgestrahlten Schallleistung flächiger Strukturen im Entwicklungsprozess im Frequenzbereich unterhalb der Koinzidenzfrequenz. Dabei wird aus Schwingformen, die als Schnellefelder vorliegen, qualitativ auf die abgestrahlte Schallleistung geschlossen. Dieses Wissen vereinfacht Entwicklungsentscheidungen im frühen Entwicklungsstadium und beschleunigt so den Entwicklungsprozess. Methodisch wird dazu ein Data-Mining-Prozess auf die Maschinenakustik angewendet.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass eine algorithmische Einordnung von Schwingformen in stark schallabstrahlende und schwach abstrahlende Schwingformen durch Klassifikation prinzipiell möglich ist. Dazu werden Testdatensätze als Test- und Trainingsbeispiele anhand einer modifizierten Rechteckplatte mit Hilfe der FEM-BEM-Kopplung erzeugt. Simuliert wird mittels FEM u. a. die Oberflächenschnelle unter Einleitung einer harmonischen Einheitskraft an der Stelle der geringsten Eingangsimpedanz. Anschließend wird die abgestrahlte Schallleistung berechnet.

Die Simulationsergebnisse stellen die Eingangsdaten für die Regelableitung und Merkmalsextraktion mit Hilfe von Klassifikationsverfahren dar. Sie werden im Rahmen der Arbeit anhand des etablierten Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) erarbeitet. Als Ergebnis wird ein Ansatz zur Bewertung von Schwingformen vorgestellt. Dabei werden die als Schnellefelder vorliegenden Schwingformen mit der Hilfe von Abstrahlgradklassen gewichtet. Die Schnellefelder lassen sich auf diese Weise in schwache Strahler, starke Strahler und Strahler, deren Abstrahlverhalten nicht genauer spezifiziert werden kann, klassifizieren. Damit kann die Prognosesicherheit der etablierten Verfahren, die auf der Bewertung der Oberflächenschnelle basieren, erhöht werden.

Demonstriert wird das entwickelte Vorgehen anhand der Bewertung von Schwingformen einer gekrümmten Platten hinsichtlich ihrer abgestrahlten Schallleistung sowie am Beispiel der Auslegung einer gekrümmten Platte mit einem applizierten piezokeramischen Biegewellenwandler. Weiterhin führt der Einsatz in der numerischen Strukturoptimierung am Beispiel der Dickenverteilung einer Rechteckplatte zu besseren Ergebnissen als eine Schnelleoptimierung ohne Schwingformgewichtung.

Zur Validierung erfolgt die Anwendung der Methode auf experimentell am Prüfstand gewonnene Daten. Es wird bestätigt, dass die Methode prinzipiell funktioniert und in Grenzen generalisierbar ist.

---

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

|   |      |
|---|------|
| Abbildungsverzeichnis.....  | iii  |
| Tabellenverzeichnis.....  | viii |
| Abkürzungsverzeichnis.....  | ix   |
| Formelzeichen.....  | x    |
| 1    Einleitung.....  | 1    |
| 1.1    Motivation und Zielsetzung.....  | 1    |
| 1.2    Aufbau der Arbeit .....  | 4    |
| 2    Stand der Forschung und Technik .....  | 6    |
| 2.1    Schallabstrahlung technischer Strukturen und geräuschgerechtes Konstruieren .....                  | 7    |
| 2.2    Optimierung von Systemen mit akustischen Zielfunktionen .....                                      | 18   |
| 2.3    Regelung akustischer Größen aktiver Struktursysteme .....  | 20   |
| 2.4    Handhabung der akustischen Anforderung <i>Schallleistung</i> im<br>Produktentwicklungsprozess..... | 24   |
| 2.5    Einordnung der vorliegenden Arbeit und Forschungsgegenstand .....                                  | 28   |
| 3    Data-Mining und Wissensmodellierung in der Maschinenakustik .....                                    | 30   |
| 3.1    Data-Mining als Prozess .....  | 31   |
| 3.2    Wissensmodellierung auf Basis akustischer Mess- und Simulationsergebnisse .....                    | 36   |
| 3.3    Analysemethoden des Data-Mining .....  | 40   |
| 3.4    Klassifikation vorliegender akustischer Systeme .....  | 41   |
| 3.4.1    Verfahren zur Klassifikation von Schwingformen .....   | 43   |
| 3.4.2    Klassifikation mit künstlichen neuronalen Netzen .....   | 46   |
| 3.4.3    Clusteranalyse mit dem <i>k</i> -Means-Algorithmus.....  | 54   |
| 3.5    Berücksichtigung von Expertenwissen und wissensbasierte Systeme .....                              | 55   |
| 4    Identifikation schallleistungsproportionaler Eigenschaften.....                                      | 57   |
| 4.1    Problemspezifikation .....   | 57   |
| 4.2    Datenbeschaffung .....   | 58   |
| 4.2.1    Generierung von Testdatensätzen zur Merkmalsextraktion .....                                     | 59   |
| 4.2.2    Simulationsergebnisse der modifizierten Rechteckplatte .....                                     | 63   |
| 4.3    Data-Mining – Klassifizierung der Schwingformen .....  | 66   |
| 4.3.1    Überwachte Klassifizierung der Schwingformen.....  | 67   |
| 4.3.2    Unüberwachte Klassifizierung der Schwingformen.....  | 68   |

---

|                           |   |      |
|---------------------------|---|------|
| 4.4                       | Musterevaluation und Merkmalsextraktion sowie deren Anwendung .....             | 83   |
| 4.4.1                     | Interpretation von Gewichtsvektoren beim Einsatz von KNN .....                  | 84   |
| 4.4.2                     | Additive und multiplikative Superposition von Schwingformen einer Klasse ....   | 85   |
| 4.4.3                     | Bewertung und Anwendung.....  | 87   |
| 4.5                       | Generalisierung der Ergebnisse .....  | 93   |
| 5                         | Schallleistungsgerechte Bewertung akustischer Systeme .....                     | 96   |
| 5.1                       | Abgestrahlte Schallleistung einer gekrümmten Schale.....                        | 96   |
| 5.2                       | Strukturoptimierung mit Hilfe identifizierter Abstrahlgradklassen.....          | 100  |
| 5.3                       | Auslegung eines resonant shunt damping mit Hilfe von Abstrahlgradklassen .....  | 106  |
| 5.4                       | Experimentelle Validierung.....   | 110  |
| 5.4.1                     | Abgestrahlte Schallleistung eines schwingenden Doppelglasfensters .....         | 110  |
| 5.4.2                     | Abgestrahlte Schallleistung einer Schalenstruktur .....                         | 113  |
| 5.5                       | Ergebnisinterpretation .....  | 118  |
| 6                         | Zusammenfassung und Ausblick .....  | 119  |
| 6.1                       | Diskussion wesentlicher Ergebnisse.....   | 119  |
| 6.2                       | Ausblick.....   | 121  |
| Anhang                    | .....   | I    |
| A.                        | Erzeugung der Testdatensätze, Simulations- und Klassifikationsergebnisse .....  | I    |
|                           | Teststruktur modifizierte Rechteckplatte.....                                   | I    |
|                           | Ergebnisse der Klassifikation mittels SOM und <i>k</i> -Means-Algorithmus ..... | III  |
| B.                        | Erläuterungen zum verwendeten Korrelationskoeffizienten.....                    | IX   |
| C.                        | Messtechnische Schallleistungsbestimmung .....                                  | X    |
|                           | Bestimmung der abgestrahlten Schallleistung der Doppelglasfensterscheibe .....  | X    |
|                           | Bestimmung der abgestrahlten Schallleistung der gekrümmten Schale.....          | XI   |
| D.                        | Verwendeter Optimierungsalgorithmus.....  | XI   |
| Literaturverzeichnis..... |   | XVII |

---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Motivierendes Umfeld der vorliegenden Fragestellung .....  | 4  |
| Abbildung 2-1: Blockschaltbild der maschinenakustischen Grundgleichung .....  | 10 |
| Abbildung 3-1: Vorgehen zur Erzeugung einer Modellbibliothek.....   | 30 |
| Abbildung 3-2: Vorgehen zur Anwendung von erkannten Regeln.....   | 30 |
| Abbildung 3-3: CRISP-DM-Kreislauf nach Chapman et al. [133].....  | 32 |
| Abbildung 3-4: Inhalte der Phasen des CRISP-DM-Kreislaufs nach [133] .....  | 32 |
| Abbildung 3-5: Visualisierung der implementierten RDF-Beschreibung (links) einer erzeugten Schwingform $ID$ und Erweiterung (rechts) .....  | 39 |
| Abbildung 3-6: Aufbau eines künstlichen Neurons in Anlehnung an [160] .....   | 46 |
| Abbildung 3-7: Dreischichtiges KNN mit vier Eingangsvariablen und zwei Klassen repräsentierenden Ausgängen.....   | 47 |
| Abbildung 3-8: Veranschaulichung einer selbstorganisierenden Karte am Beispiel eines zweidimensionalen Neuronen-Gitters als Wettbewerbsschicht.....                                       | 49 |
| Abbildung 3-9: Mögliche Topologien zweidimensionaler, rechteckiger SOM .....  | 50 |
| Abbildung 3-10: Schwerpunkte $\mu_c$ der Klassen $c$ am Beispiel von drei Klassen und Ausprägungen von zwei Merkmalen .....   | 54 |
| Abbildung 4-1: Platte mit fixierbaren Knoten und zugrunde gelegtes Koordinatensystem....  | 59 |
| Abbildung 4-2: Normierte Deformation der ersten Platteneigenmode in Abhängigkeit von der Position des fixierten Knotens .....   | 60 |
| Abbildung 4-3: Pegel des Realteils der abgestrahlten Schallleistung der jeweils angeregten Schwingformen.....   | 64 |
| Abbildung 4-4: Pegel des Realteils der abgestrahlten Schallleistung und Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle aller Samples .....   | 65 |
| Abbildung 4-5: Pegel des Realteils der abgestrahlten Schallleistung und Pegel des Abstrahlgrades aller Samples .....  | 65 |
| Abbildung 4-6: Schwingformen mit den höchsten Abstrahlgraden (normierte Darstellung). 67  |    |
| Abbildung 4-7: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Schallleistungsklassen.....  | 72 |
| Abbildung 4-8: Mittelwerte, Zentralwerte und Variationskoeffizienten der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Schallleistungsklassen..... | 72 |
| Abbildung 4-9: Breite der Klassen und Anzahl enthaltener Objekte der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Schallleistungsklassen.....     | 72 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 4-10: Kosinus-Ähnlichkeit und MAC der Klasse $K^1$ der in Abbildung 4-9<br>dargestellten Klassifikation .....                                | 75 |
| Abbildung 4-11: Kosinus-Ähnlichkeit und MAC der Klasse $K^{13}$ der in Abbildung 4-9<br>dargestellten Klassifikation .....                             | 75 |
| Abbildung 4-12: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von<br>Schnellefeldern mit 25 möglichen Abstrahlgradklassen .....         | 76 |
| Abbildung 4-13: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von<br>Schnellefeldern mit 100 möglichen Schallleistungsklassen .....     | 78 |
| Abbildung 4-14: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von<br>Schnellefeldern mit 100 möglichen Abstrahlgradklassen .....        | 78 |
| Abbildung 4-15: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von<br>Schnellefeldern mit 25 möglichen Schallleistungsklassen .....  | 80 |
| Abbildung 4-16: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von<br>Schnellefeldern mit 25 möglichen Abstrahlgradklassen .....     | 81 |
| Abbildung 4-17: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von<br>Schnellefeldern mit 100 möglichen Schallleistungsklassen ..... | 81 |
| Abbildung 4-18: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von<br>Schnellefeldern mit 100 möglichen Abstrahlgradklassen .....    | 82 |
| Abbildung 4-19: Mapping von Gewichtsvektoren einer SOM auf die Geometrie der<br>Plattenstruktur .....  | 84 |
| Abbildung 4-20: Geometrie-Mapping des Gewichtsvektors der $K^{(1)}$ .....  | 85 |
| Abbildung 4-21: Additive (links) und multiplikative (rechts) Superposition der<br>Schwingformvektoren einer Klasse .....                               | 87 |
| Abbildung 4-22: Typische Schwingformen, die in Klassen schwacher Strahler enthalten sind   | 88 |
| Abbildung 4-23: Typische Schwingformen, die in Klassen starker Strahler enthalten sind .....   | 89 |
| Abbildung 4-24: Mengen bewerteter und unbewerteter Körperschallsamples .....   | 91 |
| Abbildung 4-25: Entscheidungsbaum zur Bewertung von Schwingformen .....  | 92 |
| Abbildung 4-26: Ansatz zur Verbesserung der Bewertungsergebnisse .....   | 92 |
| Abbildung 4-27: Verschiebung der Schallintensitätsvektoren infolge einer einer gekrümmten<br>Oberfläche .....  | 95 |
| Abbildung 5-1: Erste Betriebsschwingform der Schale bei ca. 400 Hz<br>( $L_W = 108,3 \text{ dB}$ , $v^+$ , $K^{\sigma^?}$ ) .....                      | 97 |
| Abbildung 5-2: Zweite Betriebsschwingform der Schale bei ca. 432 Hz ( $L_W =$<br>$101,2 \text{ dB}$ , $v^+$ , $K^{\sigma^+}$ ) .....                   | 97 |
| Abbildung 5-3: Dritte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 516 Hz<br>( $L_W = 97,7 \text{ dB}$ , $v^+$ , $K^{\sigma^?}$ ) .....                      | 98 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 5-4: Vierte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 608 Hz<br>( $L_W = 86,2 \text{ dB}, v^-, K^{\sigma+}$ ) .....  | 98  |
| Abbildung 5-5: Fünfte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 670,7 Hz<br>( $L_W = 86,6 \text{ dB}, v^-, K^{\sigma+}$ ) .....  | 98  |
| Abbildung 5-6: Sechste Betriebsschwingform der Schale bei ca. 671,3 Hz<br>( $L_W = 86,6 \text{ dB}, v^-, K^{\sigma+}$ ) .....   | 98  |
| Abbildung 5-7: Siebte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 806 Hz<br>( $L_W = 90,1 \text{ dB}, v^-, K^{\sigma+}$ ) .....  | 99  |
| Abbildung 5-8: Achte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 809 Hz<br>( $L_W = 89,5 \text{ dB}, v^-, K^{\sigma+}$ ) .....   | 99  |
| Abbildung 5-9: Neunte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 822 Hz<br>( $L_W = 83,6 \text{ dB}, v^-, K^{\sigma+}$ ) .....  | 99  |
| Abbildung 5-10: Zehnte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 942 Hz<br>( $L_W = 94,3 \text{ dB}, v^-, K^{\sigma+}$ ) .....   | 99  |
| Abbildung 5-11: Pegel des Abstrahlgrades der harmonisch kraftangeregten Schalenstruktur<br>.....  | 100 |
| Abbildung 5-12: Dickenverteilung der Optimierung der Summe der mittleren quadratischen<br>Oberflächenschnellen an den ersten drei Eigenfrequenzen .....   | 102 |
| Abbildung 5-13: Betriebsschwingformen zu den ersten drei Eigenfrequenzen (links erste<br>Eigenfrequenz, mittig zweite Eigenfrequenz, rechts dritte Eigenfrequenz) der<br>Platte mit Dickenverteilung nach Optimierung des Summenpegels der<br>mittleren quadratischen Oberflächenschnelle (auf die maximale Schnelle<br>normiert) .....             | 103 |
| Abbildung 5-14: Dickenverteilung der Platte nach Lösung des zweiten Optimierungsproblems<br>.....   | 104 |
| Abbildung 5-15: Betriebsschwingformen zu den ersten drei Eigenfrequenzen (links erste<br>Eigenfrequenz, mittig zweite Eigenfrequenz, rechts dritte Eigenfrequenz) der<br>Platte mit Dickenverteilung nach Optimierung des Summenpegels der<br>gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnelle (auf die maximale<br>Schnelle normiert) ..... | 105 |
| Abbildung 5-16: Prinzip eines resonant shunt damping [180] .....  | 107 |
| Abbildung 5-17: Dimensionen der Schalenstruktur und Position des piezokeramischen<br>Flächenaktors .....  | 107 |
| Abbildung 5-18: FE-Modell der Schalenstruktur mit appliziertem piezokeramischem<br>Flächenaktor .....   | 108 |



|  |     |
|--|-----|
| <hr style="border: 2px solid red;"/>   |     |
| Abbildung 5-19: Elektromechanischer Kopplungsfaktor in Abhängigkeit von der Position des piezokeramischen Flächenaktors mit markiertem Bereich des maximalen Kopplungsfaktors .....                          | 109 |
| Abbildung 5-20: 1. Betriebsschwingform der Schale (normierte Darstellung) mit appliziertem shunt damping (Position der Piezokeramik bei $x_{\text{posi}} = 100$ mm und $y_{\text{posi}} = 225$ mm) .....     | 109 |
| Abbildung 5-21: 1. Betriebsschwingform der Schale (normierte Darstellung) mit appliziertem shunt damping (Position der Piezokeramik bei $x_{\text{posi}} = 130$ mm und $y_{\text{posi}} = 205$ mm) .....     | 109 |
| Abbildung 5-22: Prüfstand mit montiertem Spannrahmen (Akustikdemonstrator des LOEWE-Zentrums AdRIA) .....  | 111 |
| Abbildung 5-23: Abmessung der DGF und Position der Shaker-Anbindung (ohne eingespannte Ränder von umlaufend 20 mm Breite) .....  | 111 |
| Abbildung 5-24: Pegel der abgestrahlten Schallleistung und Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle einer in einem Spannrahmen montierten und mit einem Shaker angeregten DGF .....             | 112 |
| Abbildung 5-25: Einspannung der untersuchten Schalenstruktur im Spannrahmen und Detail der Einspannung im Spannrahmen (nicht maßstäblich) .....  | 114 |
| Abbildung 5-26: Schale in Spannrahmen .....  | 115 |
| Abbildung 5-27: Gekrümmte Schale .....   | 115 |
| Abbildung 5-28: Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle und abgestrahlte Schallleistung der in einem Spannrahmen montierten und mit einem Shaker angeregten Schalenstruktur .....              | 116 |
| Abbildung 5-29: Normierte Schwingformen (mittlere quadratische Oberflächenschnelle) der Schalenstruktur mit Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle $L_v$ und Schallleistungspegel $L_w$ ..... | 117 |
| Abbildung A-1: Schema des Anregungsszenarios .....   | II  |
| Abbildung A-2: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Schallleistungsklassen .....  | III |
| Abbildung A-3: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Abstrahlgradklassen .....   | III |
| Abbildung A-4: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Schallleistungsklassen .....  | IV  |
| Abbildung A-5: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Abstrahlgradklassen .....   | IV  |
| Abbildung A-6: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Schallleistungsklassen .....  | V   |

---

|  |      |
|--|------|
| Abbildung A-7: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Abstrahlgradklassen .....         | V    |
| Abbildung A-8: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Schallleistungsklassen .....  | VI   |
| Abbildung A-9: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Abstrahlgradklassen .....     | VI   |
| Abbildung A-10: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Schallleistungsklassen ..... | VII  |
| Abbildung A-11: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Abstrahlgradklassen .....    | VII  |
| Abbildung A-12: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Schallleistungsklassen ..... | VIII |
| Abbildung A-13: Ergebnis der automatischen unüberwachten k-Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Abstrahlgradklassen .....    | VIII |
| Abbildung A-14: Messpunkte der Schallintensitätsmessungen zur Schallleistungsbestimmung der DGF .....  | X    |
| Abbildung A-15: Messpunkte der Schallintensitätsmessungen zur Schallleistungsbestimmung der gekrümmten Schalenstruktur .....                       | XI   |
| Abbildung A-16: Blockschaltbild der Optimierung der Summe der Schnellen in OptiY .....   | XVI  |
| Abbildung A-17: Blockschaltbild der Optimierung der Summe der gewichteten Schnellen in OptiY .....   | XVI  |

---

---

## Tabellenverzeichnis

---

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 3-1: Eigenschaften eines Datensatzes der erzeugten Datenbasis .....   | 39  |
| Tabelle 3-2: Möglichkeiten der Definition von Klassen.....  | 43  |
| Tabelle 4-1: Beurteilungsmaße der unüberwachten Klassifikationen der Schnellefelder mit einer SOM .....               | 79  |
| Tabelle 4-2: Beurteilungsmaße der unüberwachten Klassifikationen der Schnellefelder mit k-Means-Algorithmus.....      | 82  |
| Tabelle 5-1: Verwendete Materialparameter der Schale.....   | 96  |
| Tabelle 5-2: Bewertung der Schwingformen hinsichtlich der abgestrahlten Schalleistung...                              | 97  |
| Tabelle 5-3: Ergebnis der Optimierung der Summe der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen.....                 | 103 |
| Tabelle 5-4: Ergebnis der Optimierung der Summe der gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnellen.....     | 105 |
| Tabelle 5-5: Ergebnis der Optimierung der Summe der gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnellen.....     | 110 |
| Tabelle 5-6: Klassifikation der sieben Schnellepeaks ( $L_{\bar{v}_t^2} > -90$ dB) im Frequenzbereich bis 500 Hz..... | 113 |
| Tabelle A-1: Koordinaten der fixierbaren Knoten $\mathbf{K}$ .....  | I   |

---

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

|          |   |
|----------|---|
| ANC      | Active Noise Control  |
| ASAC     | Active Structural Acoustic Control  |
| AVC      | Active Vibration Control  |
| BAuA     | Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  |
| BEM      | Boundary Element Method (Randelemente-Methode)  |
| CAD      | Computer Aided Design (rechnerunterstütztes Konstruieren)   |
| CRISP-DM | Cross-Industry Standard Process for Data Mining (branchenübergreifender Standard-Prozess für Data-Mining) |
| DGF      | Doppelglasfensterscheibe  |
| ERP      | equivalent radiated power (Strahlungsleistung)  |
| FE       | Finite Elemente   |
| FEM      | Finite-Elemente-Methode   |
| KDD      | Knowledge Discovery in Databases (Wissensentdeckung in Datenbanken)                                       |
| KNN      | künstliches neuronales Netz   |
| MSE      | mean squared error (mittlerer quadratischer Fehler)   |
| RBF      | radiale Basisfunktion   |
| RDF      | Resource Description Framework (sinngemäß: System zur Beschreibung von Ressourcen)                        |
| RMS      | root mean square (Effektivwert)   |
| SOM      | Self-Organizing Map (selbstorganisierende Karte)  |
| SVM      | support vector machine (Stützvektormaschine)  |
| URI      | Uniform Resource Identifier (einheitlicher Bezeichner für Ressourcen)                                     |

---

## Formelzeichen

---

### Lateinische Buchstaben

|   |  |
|---|--|
| <b><i>A</i></b>                           | Erregung eines Neurons (dimensionslos)   |
| <b><i>a</i></b>                           | Ausgangsvektor eines KNN (dimensionslos)   |
| <b><i>a<sub>jk</sub></i></b>              | Ausgangswert eines künstlichen Neurons (dimensionslos)   |
| <b><i>c</i></b>                           | Schallgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$   |
| <b><i>c<sub>N</sub></i></b>               | Anzahl der Datenpunkte einer Klasse  |
| <b><i>D</i></b>                           | Dämpfungsmatrix (Einträge in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ )  |
| <b><i>d</i></b>                           | Abstand des Minimums einer Zielfunktionsapproximation $\mathbf{x}_k$ zum Startpunkt $\mathbf{x}_{start,k}$ der $k$ -ten Iteration (Einheit der Zielfunktion) |
| <b><i>E</i></b>                           | Einheitsmatrix (dimensionslos) oder E-Modul in $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$   |
| <b><i>e</i></b>                           | Fehler des Ausganges eines künstlichen Neurons (dimensionslos)   |
| <b><i>F</i></b>                           | Kraftvektor (Einträge in N)  |
| <b><i>F</i></b>                           | Kraft in N   |
| <b><i>f</i></b>                           | Frequenz in Hz   |
| <b><i>f<sub>E</sub></i></b>               | Kugelstrahler-Eckfrequenz oder Kolbenstrahler-Eckfrequenz in Hz  |
| <b><i>f<sub>g</sub></i></b>               | Koinzidenzfrequenz in Hz   |
| <b><i>g</i></b>                           | Vektor der Integrationsfunktionen (Einträge dimensionslos)   |
| <b><i>g<sub>jk</sub></i></b>              | Integrationsfunktion eines KNN (auch Propagierungsfunktion, dimensionslos)   |
| <b><i>h<sub>k</sub></i></b>               | Koordinatenvektor einer SOM (dimensionslos)  |
| <b><i>h(x, y)</i></b>                     | Plattendicke in Abhängigkeit von der Position in m   |
| <b><i>h<sub>T</sub><sup>2</sup></i></b>   | mittlere quadratische Übertragungsadmittanz in $\frac{\text{s}^2}{\text{kg}^2}$  |
| <b><i>I</i></b>                           | Schallintensitätsvektor (Einträge in $\frac{\text{N}}{\text{ms}}$ )  |
| <b><i>J</i></b>                           | Jacobi-Matrix  |
| <b><i>K</i></b>                           | Steifigkeitsmatrix (Einträge in $\frac{\text{N}}{\text{m}}$ )  |
| <b><i>K</i></b>                           | Nummer eines fixierten Knotens   |
| <b><i>K<sup>(c)</sup></i></b>             | Klasse mit der Klassenbezeichnung $c$  |
| <b><i>k<sub>i</sub></i></b>               | elektromechanischer Kopplungsfaktoren (dimensionslos) der $i$ -ten Eigenkreisfrequenz  |
| <b><i>L</i></b>                           | Pegel einer Größe in dB  |
| <b><i>M</i></b>                           | Massenmatrix (Einträge in kg)  |
| <b><i>MAC(x, y)</i></b>                   | modal assurance criterion (dimensionslos)  |
| <b><i>MSE</i></b>                         | mittlerer quadratischer Fehler einer Größe   |
| <b><i>m</i></b>                           | Plattenmasse in kg oder nötige Anzahl von Simulationen pro Iterationsschritt zur Approximation der Zielfunktion  |
| <b><i>m<sub>M</sub><sup>(c)</sup></i></b> | Median der Klasse $K^{(c)}$ in der Einheit der Klassenobjekte  |

---

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $m_s^{(c)}$                 | Mittelwert der Klasse $K^{(c)}$ in der Einheit der Klassenobjekte  |
| $n^{(c)}$                   | Anzahl der Objekte der Klasse $K^{(c)}$  |
| $P$                         | Schallleistung in W  |
| $P_{ERP}$                   | Äquivalente Strahlungsleistung in W  |
| $p$                         | Schalldruck in $\frac{N}{m^2}$   |
| $p_{k\text{-means}}$        | zu minimierende Funktion des $k$ -Means-Algorithmus  |
| $q_\tau$                    | Gewinnerneuron des Trainingsschrittes $\tau$   |
| $R$                         | Radius (einer Kolbenmenbran oder eines Kugelstrahlers) in m oder Abstand eines Neurons (dimensionslos)                   |
| $r_j$                       | $j$ -ter Fehler der Zielfunktionsapproximation   |
| $r_{xy}$                    | Korrelationskoeffizient der Vektoren $\mathbf{x}$ und $\mathbf{y}$ (dimensionslos)                                       |
| $S$                         | Oberfläche in $m^2$  |
| $Sh_T^2$                    | Körperschallfunktion in $\frac{m^2 s^2}{kg^2}$   |
| $simK$                      | Kosinus-Ähnlichkeit (dimensionslos)  |
| $T_v^2$                     | Körperschalltransferfunktion (dimensionslos)   |
| $U_I$                       | Eingabeschicht einer SOM   |
| $U_k$                       | $k$ -te Schicht eines KNN  |
| $U_0$                       | Wettbewerbsschicht einer SOM   |
| $\mathbf{v}$                | Schnellefeldvektor (Einträge in $\frac{m}{s}$ )  |
| $v$                         | Schnelle in $\frac{m}{s}$  |
| $var^{(c)}$                 | Varianz der Klasse $K^{(c)}$ in Quadrat der Einheit der Klassenobjekte   |
| $varc^{(c)}$                | Variationskoeffizient der Klasse $K^{(c)}$ (dimensionslos)   |
| $\mathbf{w}$                | Verschiebungsvektor der Platte (Einträge in m)   |
| $\dot{\mathbf{w}}$          | Geschwindigkeitsvektor der Platte (Einträge in $\frac{m}{s}$ )   |
| $\ddot{\mathbf{w}}$         | Beschleunigungsvektor der Platte (Einträge in $\frac{m}{s^2}$ )  |
| $w_{ij}$                    | Eingangsgewichte eines KNN (dimensionslos)   |
| $\mathbf{X}_{kj}$           | Matrix der Vektoren der Designvariablen $\mathbf{x}_j$   |
| $\mathbf{x}_k$              | Vektor der Designvariablen des Minimums der Approximation der Zielfunktion (Einträge in der Einheit der Designvariablen) |
| $x_i$                       | unbestimmte Variable oder Eingangsvariable eines künstlichen Neurons (dimensionslos)                                     |
| $\mathbf{x}_0$              | Ort der Anregung (Einträge in m)   |
| $x_{\text{posi}}$           | Designvariable des Optimierungsproblems in m   |
| $\mathbf{x}_{\text{start}}$ | Startpunkt der Optimierung im ersten Iterationsschritt (Einträge in m)   |
| $y_{\text{posi}}$           | Designvariable des Optimierungsproblems in m   |
| $\tilde{y}(\mathbf{x})$     | Approximation der Zielfunktion   |
| $\tilde{y}_j$               | approximierter Funktionswert   |

---

|                    |  |
|--------------------|--|
| $y_j$              | Funktionswert der Zielfunktion   |
| $Z'_{\text{Luft}}$ | Schallkennimpedanz ca. $410 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3}$ (bei einer Temperatur von 25°C und einem Luftdruck von $101.325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ) |

### Griechische Buchstaben

|                  |   |
|------------------|---|
| $\alpha$         | Lernrate (dimensionslos)  |
| $\gamma$         | Kontraktionsparameter (dimensionslos)   |
| $\Delta I$       | Projektionsfehler der Schallintensität in $\frac{\text{N}}{\text{ms}}$  |
| $\Delta K^{(c)}$ | Breite der Klasse $c$ in der Einheit der Klassenobjekte   |
| $\eta$           | Nachbarschaftsfunktion (dimensionslos) oder Zoomparameter (dimensionslos)   |
| $\theta$         | Vektor der Schwellwerte (Einträge dimensionslos)  |
| $\theta_{jk}$    | Schwellwert eines künstlichen Neurons (dimensionslos)   |
| $\lambda_B$      | Biegewellenlänge in m   |
| $\lambda_L$      | Luftschallwellenlänge in m  |
| $\mu_c$          | Schwerpunkt der Klasse $c$ im Merkmalsraum (Einträge abhängig von den Einheiten des Merkmalsraums)                                |
| $v$              | Querkontraktionszahl (dimensionslos)  |
| $\varsigma$      | Seitenverhältnis (dimensionslos)  |
| $\rho$           | Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  |
| $\Sigma$         | empirische Standardabweichung in der Einheit der untersuchten Objekte   |
| $\sigma$         | Abstrahlgrad (dimensionslos)  |
| $\tau$           | Trainingsschritt beim Trainieren eines KNN (Epoche)   |
| $\Phi$           | Matrix der Eigenschwingformen (Einträge in Einheit der Systemfreiheitsgrade)  |
| $\phi$           | Vektor der Aktivierungsfunktionen eines KNN (in Abschnitt 3, dimensionslos) oder Eigenschwingform (in Abschnitt 4, dimensionslos) |
| $\varphi$        | Kontraktionsrate (im Anhang, dimensionslos)   |
| $\varphi_{jk}$   | Aktivierungsfunktion eines künstlichen Neurons (dimensionslos)  |
| $\chi$           | Steuerparameter für die Steigung der RBF (dimensionslos)  |
| $\Psi$           | Elementgröße eines FE-Modells in m  |
| $\Omega_i$       | $i$ -te Eigenkreisfrequenz in rad/s   |
| $\omega_j$       | Gewichtsvektor (dimensionslos)  |
| $\omega^\sigma$  | Faktor zur Gewichtung der Schnellefelder (dimensionslos)  |
| $\omega_i^o$     | Eigenkreisfrequenz mit offenen Elektroden in rad/s  |
| $\omega_i^s$     | Eigenkreisfrequenz mit kurzgeschlossenen Elektroden in rad/s  |

---

### Mathematische Operatoren, Indizes, Referenzwerte etc.

|             |   |
|-------------|---|
| $b$         | leicht gekrümmte Oberfläche                                       |
| $C$         | Klassifikator   |
| $c$         | Klassennummer   |
| $E$         | Eingang   |
| $e$         | ebene Fläche  |
| $i$         | Index der Eigenfrequenz oder Index der Eingangsvariable           |
| $j$         | Index eines künstlichen Neurons innerhalb einer Schicht           |
| $k$         | Schicht des KNN (in Abschnitt 3) oder Wellenzahl (in Abschnitt 4) |
| $\max$      | Maximum   |
| $\min$      | Minimum   |
| $P_0$       | Referenzwert der Schallleistung $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$        |
| $q$         | Indizes des Gewinner-Neurons (dimensionslos)                      |
| $v_0$       | Referenzwert der Schnelle $v_0 = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$     |
| $W$         | die Schallleistung betreffend                                     |
| $\hat{x}$   | Spitzenwert der Größe $x$   |
| $\bar{x}$   | mittlerer Wert der Größe $x$                                      |
| $\tilde{x}$ | Effektivwert der Größe $x$  |
| $x^*$       | komplexe Konjugation der Zahl $x$                                 |
| $\sigma_0$  | Referenzwert des Abstrahlgrades $\sigma_0 = 1$ (dimensionslos)    |
| $\sigma^+$  | starker Strahler  |
| $\sigma^-$  | schwacher Strahler  |
| $\sigma^?$  | nicht näher definierter Strahler                                  |
| $\tau$      | Epoche beim Training eines künstlichen neuronalen Netzes          |



---

# 1 Einleitung

---

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Berücksichtigung der abgestrahlten Schallleistung flächiger Strukturen und flächiger Struktursysteme im Entwicklungsprozess. Dabei soll aus Größen, die direkt an den schwingenden Strukturen identifiziert werden können, auf die Neigung, Schallleistung abzustrahlen, geschlossen werden können. Dazu werden Methoden des Data-Mining auf die Maschinenakustik angewendet. Aus Ergebnissen numerischer Simulationen werden Informationen über die Schallabstrahlung technischer Strukturen extrahiert und interpretiert. Da in der heutigen Entwicklung zunehmend Optimierungswerkzeuge genutzt werden und auch die Bedeutung aktiver adaptiver Systeme zunimmt, wird die Berücksichtigung der Schallleistung auch unter Aspekten der akustischen Strukturoptimierung und adaptiver Systeme behandelt.

---

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

---

Technische Erzeugnisse und Prozesse müssen heute vielfältige Anforderungen erfüllen. Diese Anforderungen sind Resultate unterschiedlichster gesellschaftlicher, politischer und ökonomischer Erfordernisse. Eine Anforderung, die für Maschinen, Fahr- und Flugzeuge gleichermaßen gilt, ist die Einhaltung von akustischen Grenzwerten. Ursächlich hierfür sind einerseits Vorgaben durch den Gesetzgeber und andererseits die Forderungen der Kunden nach leiseren oder zumindest angenehmer klingenden Produkten. In diesem Zuge unterliegen heute außerdem auch Konsumgüter zunehmend akustischen Anforderungen.

Als Reaktion auf diese akustischen Anforderungen ist heute die Auseinandersetzung mit der Akustik in vielen Branchen bereits im Produktentwicklungsprozess von großer Bedeutung. In diesem Kontext haben sich sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie die Arbeitsgebiete *Sounddesign* und *Lärminderung* etabliert. Beim *Sounddesign* ist es das Ziel, die Schallereignisse so zu gestalten, dass Benutzer oder Konsumenten diese so angenehm wie möglich oder so empfinden, wie sie es sich beim vorliegenden Produkt wünschen. Die quantitative Bewertung von Schallereignissen, welche die Wahrnehmung des Benutzers allgemeingültig beschreibt, ist trotz gängiger psychoakustischer Größen derzeit nur bedingt möglich. Die *Lärminderung* hingegen ist quantitativ vollständig bewertbar. Dabei werden zur Beurteilung u. a. die Größen Schalldruck und Schallleistung herangezogen. Der Schalldruck an einer bestimmten Stelle stellt sich infolge der Schallabstrahlung des technischen Erzeugnisses und der jeweiligen Umgebungsbedingungen (Störschall, Reflexionen, Richtcharakteristik der Schallquelle etc.) ein. Die abgestrahlte Schallleistung hingegen ist im Sinne der maschinenakustischen Grundgleichung eine strahlerspezifische Größe und nicht von Umgebungsbedingungen abhängig [1–3]. Sie ist damit die einzige vergleichbare akustische Größe, die sich zur Beurteilung der Schallemissionen unterschiedlicher Produkte eignet. Aus diesem Grund ist die Schallleistung im Kontext

---

lärmarmer Produkte von besonderem Interesse. Der Fokus der vorliegenden Arbeit richtet sich daher auf die Schalleistung als Anforderung im Entwicklungsprozess.

Akustische Anforderungen spielen im heutigen Entwicklungsprozess insbesondere in den drei Bereichen lärmarmes oder geräuschgerechtes Konstruieren, akustische Strukturoptimierung und Auslegung aktiver Systeme zur Reduzierung der Schallabstrahlung eine Rolle.

Beim lärmarmen Konstruieren existieren als Konstruktionsregeln bisher überwiegend „best-practice-Regeln“, auf die sich die Entwickler im Produktentwicklungsprozess stützen, um die akustischen Anforderungen zu berücksichtigen. Eine durchgängige Simulation der abgestrahlten Schalleistung ist im Entwicklungsprozess bisher nicht üblich. Akustische Simulationen werden in der Regel erst in einem späten Entwicklungsstadium durchgeführt. Ursächlich sind vor allem die zeitlich aufwändige und damit teure Simulation sowie die geringe Aussagekraft einfacher Modelle im frühen Entwicklungsstadium. Im Kontext des sogenannten lärmarmen Konstruierens haben sich einige Konstruktionsregeln, die primär empirisch gewonnene Erfahrungswerte darstellen, etabliert. Derartige Regeln sind beispielsweise das Anstreben einer möglichst hohen Steifigkeit, um die erste Eigenfrequenz anzuheben, oder die Erhöhung der Masse, um die Strukturschwingung generell zu mindern. Fraglich ist dieser Sachverhalt dahingehend, dass bis zur Koinzidenzfrequenz aus Größen, wie beispielsweise den Eigenfrequenzen, der Schwingsschnelle oder dem Schwingweg, nicht auf die abgestrahlte Schalleistung geschlossen werden kann, weil dazu die Fluid-Struktur-Interaktion bekannt sein müsste.

Zur Durchführung von numerischen Optimierungen im Bereich der Akustik ist die Definition einer oder mehrerer zu optimierender Größen (Zielfunktionen) nötig. Nachteiligerweise sind Optimierungen, welche die Schalleistung als Zielfunktion berücksichtigen, simulativ aufwändig und zeitintensiv, da neben den Strukturschwingungen die Schallabstrahlung in die Umgebung berechnet werden muss. Derzeit wird im Bereich der akustischen Strukturoptimierung, wie auch im klassischen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, meist mit Ersatzgrößen anstelle der Schalleistung gearbeitet. Eine zuverlässige Beurteilung der abgestrahlten Schalleistung allein auf der Basis von Strukturschwingungen würde den Optimierungsprozess daher enorm beschleunigen und die Ergebnisgüte verbessern.

Aktive Systeme zeichnen sich durch den Einsatz von Aktoren und Sensoren mit geeigneten Reglern und Leistungselektronik aus. Sie benötigen festzulegende Systemgrößen, die sensorisch erfasst und in einem Regler verarbeitet werden können. Die Reglerausgänge werden anschließend verstärkt und wirken über Aktoren wieder auf das System ein. Auf diese Weise ist es möglich, aktive Systeme so auszulegen, dass sie sich autonom auf veränderliche Umgebungsbedingungen einstellen und auf diese reagieren können. Handelt es sich um autonom auf veränderliche Umgebungsbedingungen reagierende aktive Systeme, die ihre Struktureigenschaften ändern können, und sind die Aktor-Sensor-Systeme strukturkonform integriert, spricht man

---

von adaptronischen Systemen.<sup>1</sup> Zu den veränderlichen Randbedingungen gehören insbesondere Störungen in Form unterschiedlicher Anregungen, die von der Struktur als Luft- und Körperschall emittiert werden. Ein aktives oder adaptronisches Struktursystem kann daher dazu beitragen, Luft- und Körperschallemissionen technischer Erzeugnisse zu reduzieren. Da Produkte im Produktentwicklungsprozess nicht unter exakt den Randbedingungen beurteilt und ausgelegt werden können, unter denen sie später eingesetzt werden, ist eine möglichst neutrale Beurteilung der akustischen Eigenschaften oder der aktiven Lärminderung nötig. Sinngemäß kann hier die Schallleistung als Regel- oder Beurteilungsgröße verwendet werden. Aufgrund fehlender praktikabler in-situ Schallleistungsmessverfahren werden aktive Systeme derzeit jedoch fast ausschließlich auf Basis von Strukturschwingungen, teilweise durch einzelne Mikrofone unterstützt, geregelt. Folglich findet derzeit eine schallleistungsproportionale Regelung, wenn überhaupt, nur bedingt statt.

Zusammenfassend stellt das Schließen von Strukturschwingungen auf die Schallleistung einen enormen Gewinn für das lärmarme Konstruieren, den Einsatz von Optimierungswerkzeugen im Bereich der Akustik und die Lärminderung mit Hilfe aktiver Systeme dar. Dadurch werden sowohl die schallleistungsproportionale Beurteilung von Teillösungen und Lösungen im Entwicklungsprozess als auch eine effiziente akustische Optimierung auf Basis von Körperschallsimulationen möglich. Außerdem erlaubt eine schallleistungsproportionale Beurteilung von Strukturschwingungen die Auslegung schallleistungsproportionaler Regelungen aktiver Systeme zur Lärminderung bereits im frühen Entwicklungsprozess. Sie trägt damit zu einer Erhöhung der Serienreife aktiv lärmgeminderter und speziell adaptronischer Produkte bei.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, schallleistungsproportionale Merkmale von Strukturschwingungen zu identifizieren und nutzbar zu machen. Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der Kausalkette von der Erregung der Strukturschwingungen bis hin zur abgestrahlten Schallleistung anhand der maschinenakustischen Grundgleichung diskutiert.

Das technisch motivierende Umfeld der dieser Arbeit zugrunde gelegten Fragestellung ist in Abbildung 1-1 dargestellt. Im Bereich des geräuschgerechten Konstruierens werden Konstruktionsziele benötigt, nach denen der Entwickler ein System auslegen kann. Der Begriff der Zielfunktion wurde bereits erörtert und als Regelgröße bezeichnet man die Größe eines Systems, die identifiziert und mittels einer Regelung beeinflusst werden kann. Die Begriffe *Konstruktionsziel*, *Zielfunktion* und *Regelgröße* haben folglich unterschiedliche Bedeutungen und entstammen unterschiedlichen fachlichen Disziplinen. Im Kontext der Ableitung schall-

---

<sup>1</sup> Der Begriff *Adaptronik*, wie er in dieser Arbeit verwendet wird, bezieht sich auf die Definitionen aus der VDI-Richtlinie VDI 2206 [4], nach HANSELKA [5] sowie nach JANOCHA [6]. Demnach fallen auch bestimmte semi-passive Systeme darunter. Im Englischen werden die Begriffe *smart structures*, *smart structure systems* oder *smart structure technology* synonym für den Begriff Adaptronik verwendet. In neueren Veröffentlichungen findet sich außerdem auch der Begriff *adaptronics* als englische Übersetzung.

leistungsproportionaler Merkmale kann der Sinngehalt dieser Begriffe jedoch als ähnlich aufgefasst werden. Das wird insbesondere dann deutlich, wenn man die Begrifflichkeit als quantifizierbare Maße betrachtet. So kann ein quantifizierbares Auslegungsziel als Zielfunktion in der Optimierung verwendet werden oder, sofern es sensorisch oder modellbasiert identifizierbar ist, auch als Regelgröße dienen.

Aus diesem Grund finden sich auch in der Literatur aller drei Fachdisziplinen Arbeiten, die sich mit der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellung auseinandersetzen.

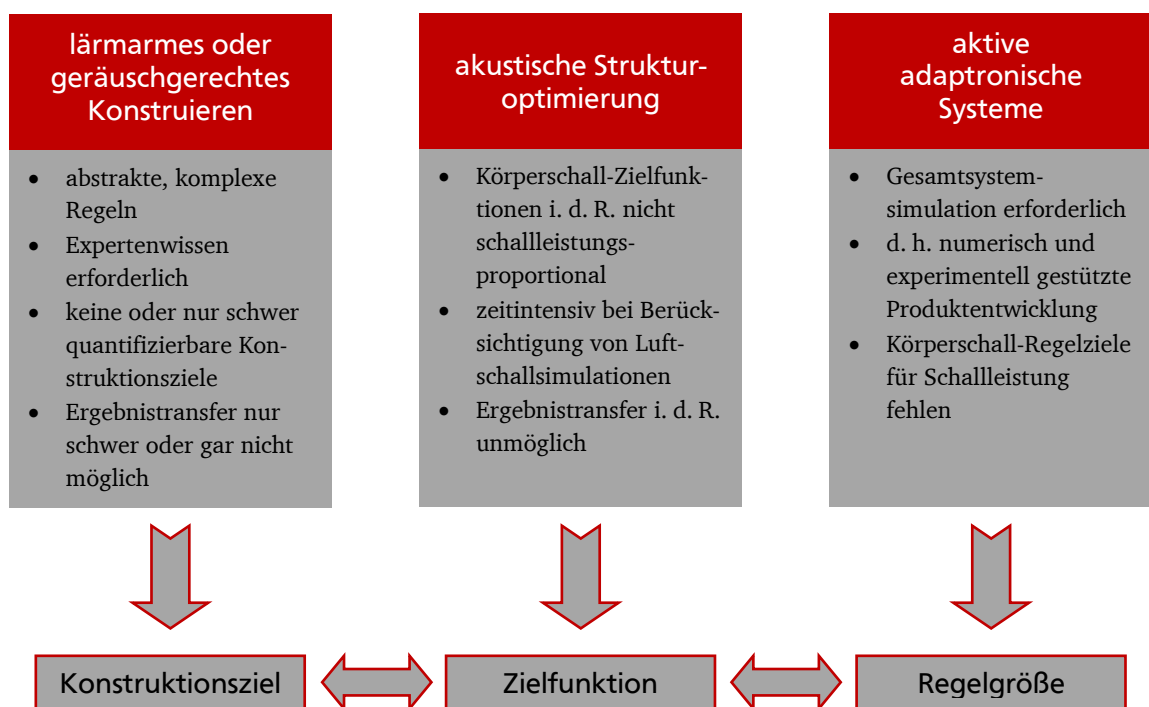


Abbildung 1-1: Motivierendes Umfeld der vorliegenden Fragestellung

Ein ebenfalls wichtiger Aspekt für Entwickler ist der Ergebnistransfer. So kann eine konstruktive Maßnahme an einem System positiv wirken, sich an einem anderen System jedoch negativ auswirken. Insbesondere im Rahmen der akustischen Strukturoptimierung können Ergebnisse praktisch nicht vom optimierten Produkt auf ein anderes Produkt übertragen werden.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an die Einleitung werden im zweiten Kapitel zunächst die Grundlagen der Schallabstrahlung sowie die Grundlagen ihrer Ermittlung mit numerischen Simulationswerkzeugen dargestellt. Auch auf die Grundlagen der Optimierung akustischer Zielfunktionen und die Regelung akustischer Regelgrößen mit aktiven Systemen wird im zweiten Kapitel eingegangen. Dabei werden sowohl der Kenntnisstand über die Mechanismen der Schallabstrahlung von Strukturen als auch die Berücksichtigung der Schallleistung im industriellen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess erörtert. Aktuelle Ansätze der akustischen Strukturoptimierung und

---

Anwendungen aktiver und adaptronischer Systeme zur Verringerung der Schallleistung werden berücksichtigt. Dieses Kapitel schließt mit einer Einordnung der vorliegenden Arbeit und der Definition des Forschungsgegenstandes.

Eine Methodik zur Anwendung von Datenanalyseverfahren in der Maschinenakustik wird im dritten Kapitel vorgestellt. Nötige Grundlagen aus dem Gebiet der Datenanalyse werden darin ebenfalls erläutert.

Auf die Ableitung schallleistungsproportionaler Merkmale wird im vierten Kapitel eingegangen. Am Beispiel einer Plattenstruktur wird die in Kapitel drei vorgestellte Methodik angewandt, und es werden charakteristische Merkmale extrahiert, identifiziert sowie bezüglich ihrer Plausibilität diskutiert. Darüber hinaus werden akustische Zielfunktionen für die Anwendung in der akustischen Strukturoptimierung miteinander verglichen und hinsichtlich ihres Einflusses auf die abgestrahlte Schallleistung untersucht.

Die Anwendung der Merkmalsextraktion erfolgt in Kapitel fünf. Darin werden Struktursysteme hinsichtlich der abgestrahlten Schallleistung und schallleistungsproportionaler Merkmale untersucht und charakterisiert sowie die Ergebnisse generalisiert.

Die Arbeit schließt mit Kapitel sechs, in welchem wesentliche Ergebnisse diskutiert und zusammengefasst werden sowie ein Ausblick auf aufbauende Fragestellungen gegeben wird.

---

## 2 Stand der Forschung und Technik

---

In der Einleitung wird motiviert, dass das Schließen der abgestrahlten Schalleistung anhand von Strukturschwingungen von Vorteil wäre. Die technischen Disziplinen des lärmarmen oder geräuschgerechten Konstruierens, die akustische Strukturoptimierung und die Auslegung aktiver Systeme liefern jeweils typische Problemstellungen, die diesen Sachverhalt bestätigen. Um dies zu erörtern, ist das Verständnis des akustischen Verhaltens von aktiven und passiven Strukturen erforderlich. Die Mechanismen der Schallabstrahlung sowie die Handhabung damit im Zusammenhang stehender Größen im Entwicklungsprozess spielen dabei eine wichtige Rolle. Daher wird in diesem Abschnitt der Stand der Forschung und Technik des akustischen Verhaltens passiver und aktiver Strukturen erläutert. Zunächst wird auf die Schallabstrahlung technischer Strukturen im Allgemeinen eingegangen und die maschinenakustische Grundgleichung als Werkzeug eingeführt.

Anschließend wird die Handhabung akustischer Größen als Anforderungen im Produktentwicklungsprozess erläutert. Dabei werden wesentliche Schallentstehungsmechanismen und der Stand der Forschung und Technik des geräuschgerechten Konstruierens erörtert.

Obwohl die Optimierung technischer Systeme mit akustischen Zielfunktionen als Teilgebiet des geräuschgerechten Konstruierens aufgefasst werden kann, wird dieser Bereich gesondert behandelt. Motiviert wird die getrennte Darstellung durch die Komplexität des Themengebietes der Optimierung selbst. Der Stand der Forschung und Technik der Optimierung von Systemen mit akustischen Zielfunktionen wird dabei erläutert.

Zum besseren Verständnis der Optimierungsmethoden im Bereich der Akustik wird die Herangehensweise bei der Modellbildung und Simulation akustischer Größen im Produktentwicklungsprozess vor dem Abschnitt über die akustische Strukturoptimierung beschrieben. Numerische Methoden stellen die Basis für die akustische Optimierung von Strukturen und Struktursystemen dar. Dabei wird auch verdeutlicht, weshalb das Schließen auf die Schalleistung anhand von Strukturschwingungen sinnvoll ist.

Die Modellbildung und Simulation akustischer Größen spielen auch bei aktiven und adaptronischen Systemen zur Lärminderung eine wesentliche Rolle. Derartige Systeme können ohne den Einsatz von Simulationswerkzeugen nicht ausgelegt werden. Die prinzipiellen Funktionsweisen aktiver und adaptronischer Systeme zur Lärminderung und der Stand der Forschung und Technik werden in diesem Abschnitt ebenfalls dargestellt. Das Kapitel schließt mit einer fachlichen Einordnung der vorliegenden Arbeit und der Ableitung des Forschungsgegenstandes.

---

## 2.1 Schallabstrahlung technischer Strukturen und geräuschgerechtes Konstruieren

---

Unter Schall im Allgemeinen werden Dichteschwankungen in Medien verstanden, die sich wellenförmig ausbreiten. Man unterscheidet weiter zwischen Fluidschall und Körperschall, wobei Fluidschall Dichteschwankungen in Fluiden (Luft, Wasser etc.) und Körperschall im weitesten Sinne Strukturschwingungen von Festkörpern bezeichnen. Fluidschall und Körperschall wechselwirken miteinander. Festkörper strahlen Schall in umliegende Medien ab und werden auch von umliegenden Medien zu Schwingungen angeregt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Schallabstrahlung im Medium Luft behandelt. Prinzipiell entsteht Luftschall aufgrund von zwei unterschiedlichen Mechanismen. Man unterscheidet zwischen der direkten Entstehung und der indirekten Entstehung von Luftschall. Im Falle der direkten Entstehung von Luftschall werden Druckschwankungen direkt erzeugt, beispielsweise durch Strömungsvorgänge (bspw. in Flugtriebwerken, Rohrleitungen etc.) oder aufgrund von Pumpvorgängen. Die indirekte Luftschallentstehung erfolgt aufgrund von krafterregten Strukturschwingungen, die über die Oberfläche der Struktur in die Umgebung abgestrahlt werden. Die prinzipiellen Mechanismen der Schallabstrahlung sind weitgehend bekannt und können einer Vielzahl von Lehrbüchern, z. B. den gegenwärtigen deutschsprachigen Standardwerken [3, 7–10], entnommen werden. Auf eine vollständige Vorstellung der Literatur wird daher verzichtet.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Betrachtung der Abstrahlung von Luftschall, der durch den Körperschall dünnwandiger Strukturen (Platten, Schalen etc.) angeregt wird. Im Folgenden wird daher nur der Stand der Forschung und Technik im Sinne dieser Einschränkung behandelt. Eine weitere Einschränkung ist, dass sich die vorliegende Arbeit explizit nur auf Luftschall im hörbaren Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz beschränkt.

Wie bereits erwähnt, sind die Mechanismen der Schallabstrahlung bekannt. Die Kenntnis dieser Schallentstehungsmechanismen führte mit zunehmender Industrialisierung und Technisierung zum Arbeitsgebiet des lärmarmen oder auch geräuschgerechten Konstruierens. Darunter versteht man das Auslegen technischer Erzeugnisse mit dem Ziel, dass diese Erzeugnisse so wenig Schall wie möglich abstrahlen. Dabei werden typischerweise keine Lösungen der Wellengleichung unter Berücksichtigung der Randbedingungen der realen Konstruktion zielführend angestrebt, sondern vielmehr ingenieurtypische Konstruktionsmethoden verfolgt. In der Literatur wird zwischen der primären und der sekundären Lärminderung unterschieden. Dabei bezieht sich die primäre Lärminderung auf Maßnahmen, die darauf abzielen, Schall erst gar nicht entstehen zu lassen. Unter sekundären Maßnahmen werden Maßnahmen verstanden, welche die Ausbreitung von Schall verhindern oder akustische Schwingungsenergie dissipieren.

In der vorliegenden Arbeit beschränkt sich die Berücksichtigung des lärmarmen Konstruierens auf Primärmaßnahmen. Ansätze und Hinweise zum lärmarmen Konstruieren enthält auch die



---

eingangs aufgeführte Standardliteratur [3, 7–10], jedoch keine allgemeinen, verbindlichen Regeln. Konkretere Regeln und allgemeine Konstruktionshinweise finden sich in den nachfolgend aufgeführten Arbeiten.

Eine Handreichung [11] der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) für die industrielle Praxis des lärmarmen Konstruierens bietet Konstrukteuren Hinweise zum lärmarmen Konstruieren. Darin sind allgemeine Regeln und Beispiele enthalten, jedoch keine konkreten Zielgrößen oder Auslegungsempfehlungen im Sinne eines Konstruktionskatalogs. Konkretere Konstruktionsregeln sowie Anwendungsbeispiele werden in [12] gegeben. Ein wissenschaftsbasiertes System, welches den Konstrukteur beim Konstruieren lärmarmen Getriebegehäuse unterstützt, wird in [13, 14] beschrieben. Detailliertere Auslegungsempfehlungen zum lärmarmen Konstruieren werden in [15] aufgeführt. In der Arbeit von KOOPMANN und FAHNLIN [16] wird umfassend die Berücksichtigung der Schallleistung im Entwicklungsprozess aufgearbeitet und dabei insbesondere die Gesamtsystems simulation, bestehend aus numerischer Simulation und messtechnischen Untersuchungen, beschrieben. Die Autoren erläutern die Auslegung lärmarmen Produkte außerdem sowohl anhand passiver als auch anhand aktiver Strukturen. Generalisierbare Auslegungsziele fehlen jedoch.

Die allgemeinen Regeln der bis hier aufgeführten Literatur basieren u. a. auf Arbeiten, die im Folgenden vorgestellt werden.

Der Prozess der Schallabstrahlung kann formal auf unterschiedliche Weise betrachtet werden. Wesentlich ist, dass zwischen der schwingenden Struktur und dem umgebenden Fluid eine Wechselwirkung im Sinne eines Energieaustausches besteht. Diese Wechselwirkung kann entweder bidirektional oder ausschließlich unidirektional betrachtet werden. In vielen Fällen, z.B. wenn der Dichteunterschied zwischen Fluid und Struktur groß ist und die Schallabstrahlung ins Freifeld erfolgt, ist eine Vernachlässigung der Rückkopplung durch das Fluid (bidirektionale Wechselwirkung) und die Annahme einer unidirektionalen Fluid-Strukturkopplung gerechtfertigt.

FÖLLER [1, 2] beschreibt die Schallentstehungskette infolge einer einzelnen Betriebskraft oder einer äußeren Störkraft mit der maschinenakustischen Grundgleichung (2-1). Dieser eingeführte Formalismus erlaubt es, dass einzelne für die Schallabstrahlung relevante Größen modellhaft getrennt voneinander betrachtet werden können.

Diese vereinfachende Beschreibung stellt eine Modellvorstellung dar, in der eine dynamische, effektive Erregerkraft  $\tilde{F}$  eine beliebige Struktur zu Schwingungen anregt, die dann die Schallleistung  $P$  in das umgebende Fluid emittiert [3]

$$P = \tilde{F}^2 Sh_T^2 (\rho c)_{\text{Luft}} \sigma. \quad (2-1)$$

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die abgestrahlte Schallleistung eine komplexe Größe ist. Der Imaginärteil der abgestrahlten Schallleistung kann als die ins Nahfeld



abgestrahlte Schallleistung aufgefasst werden. Das Nahfeld klingt mit zunehmendem Abstand zur Quelle ab, sodass der Imaginärteil der Schallleistung abhängig vom Abstand zur Quelle ist. Der Realteil hingegen ist nicht abhängig vom Abstand zur Quelle und damit eine konstante, strahlerspezifische Größe [1, 2]. Er kann als die ins Fernfeld abgestrahlte Schallleistung aufgefasst werden [8, 17] und entspricht auch der Schallleistung, die messtechnisch bestimmt und für die Bewertung von technischen Erzeugnissen im Sinne der jeweiligen Normen, insbesondere [18–20], verwendet wird. Aus diesem Grund beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Bewertung des Realteils der abgestrahlten Schallleistung. Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden der Begriff Schallleistung verwendet und weitgehend auf den Hinweis verzichtet, dass es sich dabei um den Realteil der abgestrahlten Schallleistung handelt.

Die sich aufgrund der Erregerkraft  $\tilde{F}$  einstellende Strukturschwingung wird durch die Körperschallfunktion  $Sh_T^2$  charakterisiert und das umgebende Medium durch Dichte  $\rho$  und Schallgeschwindigkeit  $c$ , woraus sich die Schallkennimpedanz  $Z'_{\text{Luft}}$

$$Z'_{\text{Luft}} = (\rho c)_{\text{Luft}} \quad (2-2)$$

des umgebenden Mediums ergibt. Der Abstrahlgrad  $\sigma$  beschreibt dimensionslos den Anteil des Körperschalls, der als Luftschall abgestrahlt wird. Die Körperschallfunktion  $Sh_T^2$  kann als mit der schwingenden, schallabstrahlenden Oberfläche  $S$  gewichtete, mittlere quadratische Übertragungsadmittanz  $h_T^2$

$$h_T^2 = \frac{\overline{\tilde{v}^2}}{\tilde{F}^2} \quad (2-3)$$

der Struktur aufgefasst werden, die sich wiederum aus dem Quotienten aus dem Quadrat der mittleren effektiven Schnelle  $\overline{\tilde{v}^2}$  und der effektiven Erregerkraft  $\tilde{F}^2$  berechnen lässt. Streng genommen müssen die Abhängigkeit vom Ort der Anregung sowie die Frequenzabhängigkeit der Komponenten der maschinenakustischen Grundgleichung bereits in (2-1) eingeführt werden, worauf jedoch aus Gründen der Lesbarkeit verzichtet wird. Daher wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Gleichungen (2-1) bis (2-6) als Funktionen sowohl in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  als auch vom Ort der Anregung  $\mathbf{x}_0$  aufgefasst werden müssen.

Weiterhin hängt die mittlere quadratische Oberflächenschnelle  $\overline{\tilde{v}^2}$  mit der effektiven Oberflächenschnelle  $\tilde{v}_E$  am Ort der Anregung  $\mathbf{x}_0$  über die Körperschalltransferfunktion

$$T_v^2 = \frac{\overline{\tilde{v}^2}}{\tilde{v}_E^2} \quad (2-4)$$

zusammen. Die Oberflächenschnelle  $\tilde{v}_E$  am Ort der Anregung  $\mathbf{x}_0$  führt dann zusammen mit der Erregerkraft  $\tilde{F}$  auf die Eingangsimpedanz

$$Z_E^2 = \frac{\tilde{F}^2}{\tilde{v}_E^2}. \quad (2-5)$$

Folglich führt eine Erhöhung der Eingangsimpedanz zu einer geringeren mittleren quadratischen Oberflächenschnelle, wenn Oberfläche, Körperschalltransferfunktion und Erregerkraft gleich bleiben.

Eine Visualisierung der maschinenakustischen Grundgleichung (2-1) kann als Blockschaltbild erfolgen. Wie in Abbildung 2-1 zu erkennen ist, handelt es sich um ein unidirektionales Modell. Dabei beschreibt der erste Block das Strukturverhalten und der zweite Block das Abstrahlverhalten.

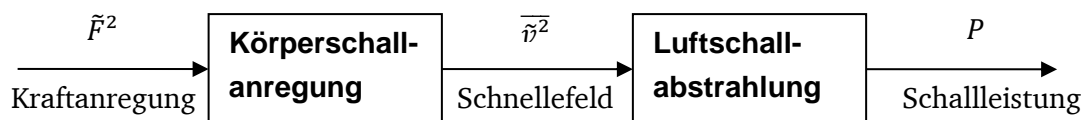


Abbildung 2-1: Blockschaltbild der maschinenakustischen Grundgleichung

Das Schnellefeld, welches sich auf der Oberfläche der schallabstrahlenden Geometrie ausbildet, strahlt Schall in die Umgebung ab. Folglich charakterisiert das Schnellefeld die Schallabstrahlung in das umgebende Fluid.

Auf Basis der obigen Beschreibung (maschinenakustische Grundgleichung) formuliert FÖLLER [1, 2] allgemeine Konstruktionshinweise. Dabei wird zwischen *der konstruktiven Beeinflussung der anregenden Kräfte* und *der konstruktiven Änderung der Eigenschaften von Maschinenteilen* unterschieden. Im Kontext der vorliegenden Arbeit sind nur die Eigenschaften von Maschinenteilen von Interesse. Diesbezüglich wird zwischen einer Anregung im Frequenzbereich unterhalb der Koinzidenzfrequenz<sup>2</sup> ( $f < f_g$ ), einer Anregung mit der Koinzidenzfrequenz ( $f = f_g$ ) und einer Anregung mit einer Frequenz oberhalb der Koinzidenzfrequenz ( $f > f_g$ ) unterschieden. Für jeden dieser Frequenzbereiche werden von FÖLLER [1, 2] abstrakte Auslegungsziele (z. B. Steifigkeit oder Masse erhöhen) in Abhängigkeit von der Anregung angegeben. Zusammengefasst werden von FÖLLER [1, 2] folgende Empfehlungen gegeben: Strukturen sollen möglichst steif ausgelegt werden, wenn es sich um eine Krafterregung handelt. Die Struktur sollte hingegen biegeweich ausgeführt werden, wenn es sich um eine Geschwindigkeitserregung handelt, deren Anregungsspektrum unterhalb der Koinzidenzfrequenz liegt oder mit ihr zusammenfällt. Außerdem ist eine möglichst hohe Masse der Struktur anzustreben. Lediglich im Falle einer Geschwindigkeitserregung mit einem Anregungsspektrum im Frequenzbereich oberhalb der Koinzidenzfrequenz spielt die Masse keine Rolle mehr. Darüber hinaus wird empfohlen, für eine möglichst hohe Dämpfung des Materials und der Fügestellen zu sorgen. Diese sehr allgemeinen Auslegungsziele werden bis heute gelehrt und erfolgreich angewandt. Offensichtlich

<sup>2</sup> Als Koinzidenzfrequenz  $f_g$  wird die Frequenz bezeichnet, bei der die Biegewellenlänge  $\lambda_B$  einer flächigen, schallabstrahlenden Struktur und die Luftschallwellenlänge  $\lambda_L$  gleich sind ( $\lambda_B = \lambda_L$ ) [21].

---

zeigt sich jedoch ein Zielkonflikt für die Auslegung, wenn das Kollektiv angreifender Anregungen des zu entwickelnden Produktes aus Kraft- und Geschwindigkeitserregungen besteht.

Die von FÖLLER verwendeten Größen orientieren sich an den Mechanismen der Schallabstrahlung, die von CREMER und HECKL [21] theoretisch am Gedankenexperiment einer unendlich ausgedehnten Platte dargestellt werden. Darin werden auch die Größe Abstrahlgrad  $\sigma$  sowie der Einfluss der Koinzidenzfrequenz  $f_g$  auf die Schallabstrahlung erläutert.

SENNHEISER [22] erweitert die theoretischen Überlegungen zur Schallabstrahlung von unendlich ausgedehnten Platten dahingehend, dass endliche Abmessungen berücksichtigt werden. Er beschränkt sich in seinen Untersuchungen auf den Frequenzbereich unterhalb der Koinzidenzfrequenz. Es wird die Schallleistung einerseits mittels räumlicher Fourier-Transformation direkt aus der Oberflächenschnelle bestimmt und andererseits mit Hilfe konzentrierter Einzelquellen. Er schließt seine Arbeit mit einem Näherungsverfahren zur Abschätzung des Abstrahlgrades für Platten.

MAIDANIK [23] zeigt am Beispiel einer Platte mit Rippen, dass der Einfluss der Dämpfung auf den Abstrahlgrad vernachlässigbar und dessen Ausprägung außerdem stark vom Ort der Kraftanregung abhängig ist. Dies deutet darauf hin, dass das Schnellefeld oder die sich einstellende Schwingform den Abstrahlgrad maßgeblich bestimmt.

Auch OPPENHEIMER und DUBOWSKI [24] geben eine Methode an, um Abstrahlgrade unterhalb der Koinzidenzfrequenz für Platten abzuschätzen. Im Gegensatz zu SENNHEISER [22] sind die korrigierten Abstrahlgrade jedoch empirisch mittels Simulationen gewonnen und messtechnisch, wenn auch nur in geringem Umfang, verifiziert. OPPENHEIMER und DUBOWSKI weisen ausdrücklich darauf hin, dass die Ergebnisse nicht als generalisierbar angesehen werden können.

Eine Sammlung praktischer Erkenntnisse für das lärmarme oder geräuschgerechte Konstruieren findet sich in der Arbeit von DIEZ und HAJE [25]. Darin wird eine an die VDI-Richtlinie VDI 2221 [26] angelehnte, computergestützte Methode vorgestellt, die Konstrukteuren die Berücksichtigung der Schallabstrahlung ermöglicht. Dabei wird ein wissensbasiertes Modell des Produktes erstellt, worin die Kopplungen einzelner Bauteile miteinander beschrieben werden. Am Ende steht eine Wirkungskette, die Rückschlüsse auf die Schallabstrahlung zulässt. Je detaillierter das Modell und je mehr Informationen über die einzelnen Komponenten existieren, desto genauer ist die Prognosequalität der Methode. Die Methode systematisiert die in früheren Arbeiten (z. B. [1, 2, 21]) vorgestellten Erkenntnisse zur Minimierung der Schallabstrahlung, liefert aber keine neuen eigenständigen Regeln zum lärmarmen Konstruieren. Eine quantitative Bewertung der Schallleistung oder des Abstrahlgrades finden darin nicht statt.

Eine Sammlung für die standardisierte Herangehensweise zum lärmarmen Konstruieren findet sich in den Richtlinien für die Konstruktion lärmarmen Maschinen und Geräte. Dabei sind in

---

DIN EN ISO 11688 Teil 1 [27] (aktualisierte Fassung [28]) allgemeine Hinweise und Planungshilfen zu finden und DIN EN ISO 11688 Teil 2 [29] enthält neben detaillierten Konstruktionsregeln außerdem Leitfäden für die Berücksichtigung von Messtechnik und den Einsatz von numerischen Simulationswerkzeugen.

Der Einsatz numerischer Werkzeuge, im Wesentlichen der Finite-Elemente-Methode (FEM) und der Randelemente-Methode (kurz BEM für die englische Bezeichnung *boundary element method*), nimmt mit der steigenden Verfügbarkeit auch im Bereich des lärmarmen Konstruierens zu. Beispiele zur Berechnung der Schallabstrahlung aus der Praxis werden von SEYBERT und HERRIN [30] vorgestellt. Darin werden die Schallabstrahlungsrechnungen mittels FEM-BEM-Kopplung durchgeführt. Untersucht werden eine quaderförmige Box, das Führerhaus eines Krans, die Ölwanne eines Dieselmotors und das Rad eines Schienenfahrzeugs. Die Schallleistung wird explizit betrachtet. Ähnliche Arbeiten von SEYBERT [31, 32] handeln von der Berechnung der Schallabstrahlung im praktischen Entwicklungsprozess.

Der Einsatz der FEM zur Berechnung der Schallabstrahlung wird auch von KOLLMANN [33] beschrieben. Darin liefert er außerdem eine große Anzahl Konstruktionsregeln zum lärmarmen Konstruieren, wobei er u. a. die von FÖLLER in [1, 2] angegebenen Hinweise präzisiert. Darunter findet sich auch der Hinweis, eine Struktur derart zu gestalten, dass die erste Eigenfrequenz möglichst hoch ausfällt. Die Begründung ist, dass auf diese Weise der Eigentonbereich, also der stärker schwinganfällige Eigenfrequenzen enthaltende Frequenzbereich, durch die Verschiebung nach oben verkleinert wird. Darüber hinaus kritisiert er die Bedeutung der maschinenakustischen Grundgleichung dahingehend, dass es sich um eine Modellvorstellung handle, die zwar eine wertvolle Hilfe im Entwicklungsprozess sei, dabei jedoch keine hinreichend genaue Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung erlaube. Als Ursache wird die schwierige Abschätzung des Abstrahlgrades angeführt.

Die schwierige Handhabung des Abstrahlgrades wird nicht nur von KOLLMANN angeführt, sondern auch von CREMER, HECKL und PETERSSON [34] thematisiert. So findet sich in [34] die Aussage: „(...) *the radiation efficiency  $\sigma$  is a useful but dangerous quantity.*”<sup>3</sup> Dabei beziehen sich die Autoren auf die Eigenschaft des Abstrahlgrades, keine reine geometrieabhängige Größe zu sein, da er, außer von der Geometrie der schwingenden Struktur, auch von den Randbedingungen beeinflusst wird, denen die Struktur unterliegt.

Wegen der oben genannten Gründe wird der Abstrahlgrad häufig vernachlässigt. Eine insbesondere im Automobilbau etablierte Möglichkeit der Vernachlässigung des Abstrahlgrades ist die Verwendung der äquivalenten Strahlungsleistung  $P_{\text{ERP}}$  (meist ERP für die englische Bezeichnung *equivalent radiated power*) [17, 35–38]. Dabei handelt es sich prinzipiell um eine Berechnung der abgestrahlten Schallleistung im Sinne der maschinenakustischen Grundgleichung,

---

<sup>3</sup> entnommen aus [34], S. 451 f.

wobei aber der Abstrahlgrad  $\sigma = 1$  gesetzt wird. Folglich werden lediglich die Ausprägung des Schnellefeldes und die abstrahlende Oberfläche zur Abschätzung der Schallleistung herangezogen. Diese Vernachlässigung des Abstrahlgrades führt jedoch zu einem Fehler. Wird die äquivalente Strahlungsleistung  $P_{\text{ERP}}$  numerisch berechnet, kann sie direkt aus den komplexen Oberflächenschnellen  $v_n$  bestimmt werden, die quadriert und über die Oberfläche  $S$  integriert werden

$$P_{\text{ERP}} = F^2 S \frac{T_v^2}{Z_E^2} Z'_{\text{Luft}} = \frac{1}{2} Z'_{\text{Luft}} \int_S (v_n v_n) dS. \quad (2-6)$$

Die Schallkennimpedanz  $Z'_{\text{Luft}}$  liegt bei ca.  $410 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3}$  und wird auch Schallkennimpedanz genannt. Beim Vergleich von Strukturen (Produktvarianten) gleicher Oberfläche  $S$  wird häufig lediglich die mittlere quadratische Oberflächenschnelle  $\bar{v}^2$  als Bewertungsgröße anstelle der abgestrahlten Schallleistung herangezogen, da sowohl  $Z'_{\text{Luft}}$  als auch  $S$  konstant sind.

So wird beispielsweise in [39] der Einsatz stark gedämpfter Tilger zur Erhöhung des Schalldämm-Maßes<sup>4</sup> einer Glasscheibe beschrieben. Darin wird gezeigt, dass sich das Schalldämm-Maß nicht in gleichem Maße erhöht, um welches sich die Oberflächenschnelle der Scheibe verringert. Folglich kann auch kein einfacher Zusammenhang zwischen der Oberflächenschnelle und der Schalltransmission aufgestellt werden. Auch hier hat offenbar der Abstrahlgrad der schwingenden Glasscheibe einen wesentlichen Einfluss, wenn man davon ausgeht, dass der Körperschalltransfer in die Struktur, welche die Fensterscheibe lagert, unverändert bleibt.

Aufgrund des unsicherheitsbehafteten Wissens über den Abstrahlgrad wird teilweise auf die konkrete Berücksichtigung der Schallabstrahlungsmechanismen verzichtet. Vielmehr wird versucht, Korrelationen zwischen Luft- und Körperschallgrößen zu finden. So zeigen KIM und SINGH in [40] Korrelationen zwischen Körperschall (Oberflächenschnelle) und Luftschall (Schalldruck und Schallleistung) anhand einer abstrahierten Maschinenstruktur, bestehend aus einem L-Plattenstoß mit angekoppelten Massen. Eine Generalisierung der Ergebnisse auf andere Strukturen wird dabei jedoch nicht vorgenommen. Ähnliche Untersuchungen, wenn auch mit einem anderen Fokus, werden auch von LEE und SINGH [41] durchgeführt. Darin werden die abgestrahlte Schallleistung und die Abstrahlgrade der Eigenmoden von Bremsscheiben untersucht. Dabei werden sowohl analytische als auch numerische Berechnungen durchgeführt, die anschließend mit Experimenten verglichen werden. Allgemeine Regeln zur Abschätzung des Abstrahlgrades werden nicht abgeleitet.

<sup>4</sup> Das Schalldämm-Maß beschreibt den 10-fachen Logarithmus des Verhältnisses zwischen der Schallleistung eines Senders und der Schallleistung, die auf der anderen Seite einer Schallschutzmaßnahme, wie bspw. einer Kapsel, einer Wand, eines Fensters oder einer Tür, ankommt (siehe z. B. [7]).

---

Arbeiten, die sich grundlegend mit der Schallabstrahlung im Allgemeinen und mit der abgestrahlten Schalleistung generischer oder einfacher Strukturen im Speziellen befassen, wie beispielsweise Platten, Balken oder Schalen, gibt es sehr viele. Um einen Überblick über diese Arbeiten zu erhalten, seien nachfolgend für die Motivation und Ausgangssituation der vorliegenden Arbeit wesentliche Publikationen in chronologischer Folge aufgeführt.

Am Beispiel eines Zylinders beschreibt BORGIOTTI [42] Geschwindigkeitsverteilungen, er nennt sie Geschwindigkeitsmuster, die zu starker und weniger starker Schallabstrahlung führen. Damit wird erstmals eine Klassifizierung in schallabstrahlende und nicht oder weniger schallabstrahlende Geschwindigkeitsverteilungen vorgenommen. Die Ergebnisse basieren auf numerischen Simulationen, sind von theoretischer Natur und von geringem praktischen Nutzen, worauf der Autor in seiner Arbeit auch ausdrücklich hinweist.

CUNEFARE [43] beschreibt Geschwindigkeitsverteilungen von Eigenmoden eines Balkens und einer Platte, die zu minimalen Abstrahlgraden führen. Die Arbeit ist rein theoretisch und basiert auf einem analytischen Ansatz im Falle des Balkens sowie auf einem numerischen Ansatz für die Platte. Dazu werden jeweils die modalen Lösungen der Eigenwertprobleme gewählt und optimale, gekoppelte Geschwindigkeitsverteilungen aus den modalen Geschwindigkeitsanteilen zusammengesetzt. Zusammenfassend wird postuliert, dass „gerade“ Eigenformen generell zu niedrigeren Abstrahlgraden führen. Mit „geraden“ Eigenformen sind diejenigen Eigenformen gemeint, die sowohl über die Länge als auch über die Breite der Platte eine gerade Anzahl Schwingungsbäuche haben.

Ebenfalls Geschwindigkeitsverteilungen für niedrige Abstrahlgrade sind Gegenstand der Arbeit von NAGHSHINEH, KOOPMANN und BELEGUNDU [44]. Darin werden Materialparameter (E-Modul und Dichte) einer Platte in einer unendlichen Wand in einem Modell elementweise verändert, um Geschwindigkeitsfelder in den Eigenfrequenzen zu erzeugen, die möglichst geringe Abstrahlgrade aufweisen. Die Schallabstrahlung einer als Kreisring abstrahierten Festplatte wird von LEE und SINGH [45] untersucht. Darin werden zwei analytische Formulierungen sowie die Lösung einer BEM-Simulation miteinander verglichen. Als generalisierte Aussage wird postuliert, dass die Abstrahlgrade axialsymmetrischer Strukturmoden des Kreisringes größer als die asymmetrischer Moden mit der gleichen Anzahl ringförmiger Knotenlinien sind.

Eine ausführliche Darstellung der Schallabstrahlung von Platten mit diversen Randbedingungen findet in einer Arbeit von PUTRA [46] statt. Dabei wird insbesondere auf die Schallabstrahlung von perforierten Platten eingegangen. Neue Erkenntnisse zur Abschätzung von Abstrahlgrad oder Schalleistung werden darin nicht angegeben. ARENAS [47–49] gibt eine Abschätzungsmethode für die abgestrahlte Schalleistung anhand der modalen Strahlungswiderstände an. Die Schallabstrahlung und die Schalleistung einer kastenartigen Struktur ist Gegenstand einer Arbeit von LIN und PAN [50]. VAN ENGELEN [51] setzt sich mit der Schallabstrahlung und dem Abstrahlgrad einer Rechteckplatte in der unendlichen Schallwand auseinander. Methodisch

---

wendet er dazu die FEM-BEM-Kopplung an und vergleicht die Ergebnisse mit denen eines analytischen Ansatzes.

Weitere Arbeiten, die sich mit der Schallabstrahlung generischer Strukturen befassen, werden in Abschnitt 2.3 aufgegriffen, da die jeweiligen Erkenntnisse aus Zielsetzungen aktiver Systeme entstammen.

Trotz der Vielzahl durchgeführter Arbeiten lassen sich keine allgemeingültigen Regeln für beliebige Geometrien ableiten, die zur Auslegung von Strukturen oder Struktursystemen mit verminderter Schallabstrahlung dienen können. Lediglich die Übertragung von Ergebnissen einer geometrischen Struktur auf eine geometrisch ähnliche Struktur ist in Grenzen möglich. So werden von WEBER, KOLLMANN und MÜLLER [52, 53] für Platten und Getriebegehäuse akustische Modellgesetze erarbeitet, die die Transformation von akustischen Größen in gewissen Grenzen und in Abhängigkeit von den geometrischen Verhältnissen erlauben. Diese akustischen Modellgesetze finden sich später auch im Standardwerk von KOLLMANN, SCHÖSSER und ANGERT [3]. Verhältnisgrößen nutzt auch GRAF [54] in seiner Dissertation zur Erarbeitung einer Richtlinie zur Gestaltung von Versteifungsrippen für Getriebegehäuse, um die abgestrahlte Schallleistung zu reduzieren. Er führt für bestimmte Getriebeformen Gestaltungsempfehlungen für Verrippungen ein, wobei er für die Rippen bezogene Breiten- und Höheverhältnisse als Entwicklungsziel mit einer einzuhaltenden Obergrenze angibt.

An dieser Stelle lassen sich folgende Erkenntnisse, die sich aus dem Stand der Forschung und Technik ergeben, festhalten:

Es gibt Regeln des geräuschgerechten Konstruierens, die jedoch gar nicht oder nur abstrakt quantifizierbar sind und keine Allgemeingültig besitzen.

Die maschinenakustische Grundgleichung lässt den Schluss zu, dass zwecks einer Schallleistungsminderung entweder die anregenden Kräfte reduziert, die Eingangsimpedanzen  $Z_E$  erhöht oder die Oberflächenschnellen  $v_n$  oder der Abstrahlgrad  $\sigma$  reduziert werden müssen. Auch eine Verkleinerung der abstrahlenden Oberfläche  $S$  kann zu einer verminderten abgestrahlten Schallleistung führen. Alle Größen können streng genommen allerdings nicht unabhängig voneinander betrachtet werden.

Der Abstrahlgrad  $\sigma$  unterhalb der Koinzidenzfrequenz  $f_g$  realer Strukturen ist schwer zugänglich und zuverlässige Abschätzverfahren für reale Strukturen fehlen.

Die Schallschnelle kann (auch als äquivalente Strahlungsleistung  $P_{ERP}$  oder Körperschallfunktion  $Sh_T^2$ ) als den Abstrahlgrad  $\sigma$  vernachlässigende und damit unzuverlässige Bewertungsgröße herangezogen werden.



---

Aufgrund der Wichtigkeit und um die Schwierigkeit der Abschätzung zu verdeutlichen, werden nachfolgend der Abstrahlgrad selbst sowie Abstrahlgrade typischer akustischer Strahler kurz erläutert.

Die Definition des Abstrahlgrades  $\sigma$  ergibt sich u. a. aus der maschinenakustischen Grundgleichung (2-1). Er kann als Quotient der abgestrahlten Schallleistung  $P$  und der hypothetischen Schallleistung gesehen werden, die von einer konphas mit der effektiven Schnelle  $\tilde{v}_n$  schwingenden Oberfläche  $S$  in die umgebende Luft abgestrahlt werden würde. Folglich können unterschiedliche Abstrahlgrade bei gleichen mittleren quadratischen Oberflächenschnellen  $\overline{\tilde{v}_n^2}$  aufgrund unterschiedlich ausgeprägter Schnellefelder entstehen.

Eine Möglichkeit der Abstrahlgradschätzung ist die Verwendung von akustischen Elementarstrahlern. Der erste und wichtigste akustische Elementarstrahler ist der Monopolstrahler, der auch „atmende Kugel“ oder Monopolstrahler genannt wird. Dabei handelt es sich um die idealisierte Modellvorstellung einer kugelförmigen Schallquelle, die konzentrische Kugelwellen in die umgebende Luft abstrahlt. Der Pegel des Abstrahlgrades (Abstrahlmaß)

$$L_\sigma = 10 \lg \sigma \text{ dB} \quad (2-7)$$

steigt beim Monopolstrahler mit 20 dB pro Frequenzdekade bis zur Kugelstrahler-Eckfrequenz  $f_E$  an. Knapp unterhalb der Kugelstrahler-Eckfrequenz ändert sich der Verlauf und nähert sich asymptotisch dem Wert von 0 dB und damit einem Abstrahlgrad von  $\sigma = 1$  [3]. Als der Elementarstrahler mit der geringsten Steigung im Verlauf des Abstrahlgrades dient er häufig als obere Schranke für Abschätzungen des Abstrahlgrades der jeweils zugrunde gelegten Struktur. In der Produktentwicklung werden kastenförmige Maschinengehäuse, Getriebegehäuse oder Motorblöcke häufig in erster Näherung als Monopolstrahler gehandhabt.

Kugelstrahler können neben dem *Atmen* weitere Strahlerformen ausprägen. Schwingt die Kugel translatorisch auf einer Achse um ihren Ruhepunkt, ohne dabei ihr Volumen zu verändern, handelt es sich um einen Kugelstrahler 1. Ordnung. Dieser Elementarstrahler besitzt bei der Schallabstrahlung, im Gegensatz zum Monopolstrahler, eine Richtcharakteristik. Das Abstrahlmaß nähert sich auch in diesem Fall asymptotisch dem Wert von 0 dB, die Steigung des Verlaufs liegt jedoch bei 40 dB pro Frequenzdekade [55]. Man kann die Ausprägungen der Kugelstrahler weiter entwickeln. Die Ausprägungen von Druckminima und Druckmaxima lassen sich dabei als Kugelflächenfunktionen beschreiben (z. B. Quadrupol usw.). Man erhält dann mit jedem weiteren Elementarstrahler eine andere Richtcharakteristik und eine stärkere Steigung des Abstrahlgrades. Ab dem Kugelstrahler 2. Ordnung überschwingt der Verlauf des Abstrahlgrades unterhalb der Kugelstrahler-Eckfrequenz  $f_E$  auf Werte von  $\sigma > 1$ . Im Frequenzbereich  $f > f_E$  nähert sich der Abstrahlgrad dann aber auch bei Kugelstrahlern höherer Ordnung wieder dem Wert von  $\sigma = 1$ .



---

Eine weitere Modellvorstellung eines Strahlers, die für Abschätzungen verwendet wird, ist die Kolbenmembran. Dabei handelt es sich um die Vorstellung einer kreisrunden Fläche, die konphas innerhalb einer unendlich ausgedehnten schallharten Wand schwingt. Das Abstrahlmaß steigt, wie auch das des Monopolstrahler, mit 20 dB pro Frequenzdekade. Auch das asymptotische Verhalten ist vergleichbar. Im Gegensatz zum Monopolstrahler der Verlauf des Abstrahlmaßes um den Bereich der Kolbenstrahler-Eckfrequenz  $f_E$ , ähnlich wie im Falle des Kugelstrahlers 1. Ordnung [3]. Der Kolbenstrahler dient außerdem als Ersatzmodell für die Schallabstrahlung von allseits gelenkig gelagerten, ebenen Rechteckplatten unterhalb ihrer ersten Eigenfrequenz. Dieser Frequenzbereich wird auch quasistatischer Bereich genannt. Ab der ersten Eigenfrequenz hängt der Abstrahlgrad dann von mehreren Faktoren ab und steigt bis zur Koinzidenzfrequenz  $f_g$  an, wo er sein Maximum hat. Oberhalb der Koinzidenzfrequenz schwankt er um den Wert von  $\sigma = 1$  [3, 56].

---

## 2.2 Optimierung von Systemen mit akustischen Zielfunktionen

---

Die Optimierung ist ein etablierter Bestandteil im modernen Produktentwicklungsprozess. Als Methode dient sie der Auffindung einer bestmöglichen Lösung. Dabei wird ein System systematisch verändert und hinsichtlich einer zu definierenden Größe, der Zielfunktion, bewertet. Wird die Zielfunktion systematisch mit Hilfe von Algorithmen verkleinert<sup>5</sup> und ein vermeintliches Minimum gefunden, spricht man von Optimierung. Diese Methode wird auch auf akustische Systeme angewandt, wobei sich die akustische Strukturoptimierung als eigene Disziplin etabliert hat.

Einführend sei angemerkt, dass im Folgenden ausschließlich Arbeiten berücksichtigt sind, bei denen Primärmaßnahmen im Sinne der unter Abschnitt 2.1 gemachten Einschränkungen im Rahmen von Optimierungsprozeduren durchgeführt werden.

Der Stand der Forschung im Bereich der akustischen Strukturoptimierung bis 2004 wird ausführlich von BÖS [59] wiedergegeben und wird hier nicht im Detail wiederholt. BÖS selbst untersucht in seiner Arbeit die Optimierung der ersten Eigenfrequenz im Sinne einer Maximierung, die Optimierung des Abstands zwischen zwei Eigenfrequenzen, ebenfalls als Maximierungsaufgabe, sowie die Optimierung des Körperschallsummenpegels innerhalb eines definierten Frequenzbereichs. Auch eine Massenoptimierung mit akustischen Restriktionen wird durchgeführt. Damit wendet Bös in [59] gängige Zielfunktionen zur Optimierung an, die auch beim lärmarmen Konstruieren zugrunde gelegt werden. Die Ergebnisse werden in [60] zusammengefasst. Eine Berücksichtigung der Schallleistung findet nicht statt.

Einen Vergleich von 12 unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen für Anwendungen in der akustischen Strukturoptimierung zeigt RANJBAR [61]. Als Zielfunktion dient die Körperschallfunktion. Die Schallleistung dient im Rahmen der Arbeit nicht explizit als Zielfunktion der Optimierungsprozeduren. Dennoch werden die abgestrahlten Schallleistungen der Ausgangsdesigns sowie der optimierten Geometrien ermittelt und gegenübergestellt. Die Arbeit enthält darüber hinaus einen ausführlichen Stand der Forschung hinsichtlich der akustischen Strukturoptimierung mit der Größe Schallleistung als Zielfunktion.

Darüber hinaus werden bei der Optimierung von Systemen mit akustischen Zielfunktionen häufig andere Größen der Struktur (z. B. Eigenfrequenzen, Oberflächenschnelle) oder der Schalldruck an einer bestimmten Stelle als Zielfunktion verwendet.

Im Jahr 2004 zeigte JOHNSON [62] die Optimierung des Schalldrucks im Inneren eines eingespannten Kreiszylinders, der aus mehreren Schichten eines Faserverbundwerkstoffes aufgebaut

---

<sup>5</sup> Um eine Optimierung mit dem Ziel einer Maximierung durchzuführen, wird die zu maximierende Größe in der Regel formal mit  $-1$  multipliziert und dann als Zielfunktion verwendet [57, 58]. Alternativ kann auch der Kehrwert verwendet werden.

---

ist. Der Schalldruck im Innenraum einer Fahrerkabine eines Geländefahrzeuges dient auch bei DONG, CHOI und KIM [63] als Zielfunktion sowie bei BREGANT, MICCOLI und SEPPI [64], wobei in der letztgenannten Arbeit der Innenraum der Fahrerkabine eines Radladers betrachtet wird. Weitere Arbeiten, bei denen zur Strukturoptimierung der Schalldruck als Zielfunktion verwendet wurde, sind [65–69].

Vor allem im Bereich des Fahrzeugbaus ist die Optimierung der ersten Eigenfrequenz ein häufig anzutreffendes Verfahren. Dieses wird von DUDDECK [70] im Allgemeinen thematisiert, allerdings nicht explizit durchgeführt oder im Detail beschrieben. Die Optimierungen der ersten Eigenfrequenz, u. a. von einer Ersatzradmulde, einem Motorschutzblech sowie einer Heckablage werden von HARZHEIM [57] beschrieben. In den beschriebenen Fällen ist unter Optimierung der ersten Eigenfrequenz deren Anhebung zu verstehen. Verändert werden jeweils die Geometrien der Bauteile. Die Topologieoptimierung eines Kompressors zur Erhöhung der ersten Eigenfrequenz wird von JONGCHAN und WANG [71] beschrieben. Die Arbeit von VEIZ und WILL [72] stellt die Optimierung der Ölwanne eines Pkw-Motors dar, ebenfalls mit dem Ziel einer Erhöhung der ersten Eigenfrequenz. Sowohl die Minimierung als auch die Maximierung der ersten Eigenfrequenz einer Kofferraumabtrennung werden von LEE und KIM [73] behandelt. Die Anhebung der ersten Eigenfrequenz einer Fahrerkabine eines Lkw als Optimierungsaufgabe ist Gegenstand der Arbeit von BINXING et al. [74].

Eine weitere Zielfunktion, die mit dem Ziel der Verringerung der Schallabstrahlung verwendet wird, ist die Modendichte, also der Frequenzabstand zwischen den im betrachteten Frequenzbereich zugrunde gelegten Eigenfrequenzen. Diese Zielfunktion wird beispielsweise von HALKJAER, SIGMUND und JENSEN [75] sowie von JENSEN und PEDERSEN [76] verwendet, um den Abstand zweier benachbarter Eigenfrequenzen einer ebenen aus zwei Materialien bestehenden Rechteckplatte zu erhöhen. BEITELSCHMIDT, STÜWING und QUARZ [77] verwenden die Modendichte eines Radsatzes für Schienenfahrzeuge als Zielfunktion, um die Schallabstrahlung insgesamt zu reduzieren.

Als Körperschallgröße stellt die Schallschnelle auf der Strukturoberfläche eine wichtige Zielfunktion in der akustischen Strukturoptimierung dar, wie beispielsweise bei ERCAN und HULBERT [78], wo explizit die mittlere quadratische Oberflächenschnelle als Zielfunktion genannt wird. Die gleiche Zielfunktion wird auch von FRANCO, CUNEFARE und RUZZENE [79] zur Optimierung von Sandwichpanelen sowie von ZHANG und CHENG [80] zur Optimierung einer Rechteckplatte verwendet.

Aus der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle, der Anregung und der schwingenden Oberfläche ergibt sich unmittelbar die Körperschallfunktion. Diese ist als wesentlicher Bestandteil der maschinenakustischen Grundgleichung (siehe Kapitel 2.1) zur Bewertung der akustischen Eigenschaften einer Struktur ebenfalls geeignet und wird als Zielfunktion verwendet. Außer in den Arbeiten von BÖS [59, 60] und RANJBAR [61] findet sich die Körperschallfunktion als

---

Zielfunktion auch in einer Arbeit von RANJBAR, MARBURG und HARDTKE [81], wobei hier eine Rechteckplatte als Untersuchungsobjekt dient und explizit der mittlere Pegel der Körperschallfunktion innerhalb eines definierten Frequenzbereichs als Zielfunktion verwendet wird.

Aufgrund ihrer Bedeutung wird die abgestrahlte Schallleistung natürlich ebenfalls als Zielfunktion bei numerischen Optimierungsproblemen verwendet. Erstmals widmen sich BELEGUNDU et al. in [82] der abgestrahlten Schallleistung einer Platte und einer Deckelplatte eines Motorgehäuses mittels Optimierung. In der Arbeit dienen die Plattendicken als Designvariablen. JEON und OKUMA [83] optimieren die abgestrahlte Schallleistung einer Platte, wobei die Platte Sicken aufweist, deren beschreibende Parameter als Designvariablen dienen. Die abgestrahlte Schallleistung einer Sandwichstruktur sowie die transmittierte Schallleistung einer Sandwichstruktur infolge einer Strukturanregung werden von DENLI und SUN [84, 85] als Zielfunktionen verwendet. Gegenstand der Arbeit von JOSHI et al. [86] ist die Optimierung der abgestrahlten Schallleistung eines versteiften Panels. Die Materialoptimierung an diskreten Stellen von laminierten Composite-Platten mit der Schallleistung als Zielfunktion wird von NIU et al. [87] beschrieben. Anstelle der abgestrahlten Schallleistung einer Struktur dient bei CHOI et al. [88] die in ein Fahrzeug eingetragene Schallleistung als Zielfunktion.

---

### 2.3 Regelung akustischer Größen aktiver Struktursysteme

---

Aktive und adaptronische Systeme stellen neuartige Ansätze zur Lärminderung dar. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass zusätzliche Energie zugeführt wird, um die Schallabstrahlung des Struktursystems zu reduzieren. Ein Ansatz zur aktiven Lärminderung ist *Active Noise Control* (ANC) und ein weiterer *Active Structural Acoustic Control* (ASAC). Beim ANC werden zusätzliche Luftschallquellen so positioniert und geregelt, dass das von ihnen emittierte Schallfeld mit dem ursprünglichen Schallfeld an einer oder mehreren Stellen destruktiv interferiert und es an diesen Stellen zu einer gegenseitigen Auslöschung des Schalldrucks kommt. Das Prinzip von ASAC basiert auf der Idee, die Strukturschwingungen der störenden Schallquelle an ihrem Entstehungsort zu eliminieren. Dazu werden mit Aktoren Kräfte in die Strukturen eingeleitet. Einen weiteren aktiven Ansatz stellt *Active Vibration Control* (AVC) dar. Bei diesem Ansatz werden lediglich Strukturschwingungen aktiv gemindert, jedoch nicht explizit Luftschallgrößen als Zielfunktionen verfolgt oder als Regelgrößen verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich ASAC- und AVC-Systeme berücksichtigt.

In der Literatur werden unterschiedliche Regelgrößen verwendet, um bei ASAC- und AVC-Systemen das Ziel der Lärminderung zu realisieren. In erster Linie werden die Beschleunigung, die Schwinggeschwindigkeit, der Schwingweg oder daraus abgeleitete Größen, wie beispielsweise das verdrängte Luftvolumen, als Regelgrößen genutzt. Nachfolgend werden derartige Arbeiten vorgestellt.

---

Die aktive Minderung der abgestrahlten Schallleistung in das Fernfeld eines Balkens ist Gegenstand der Arbeit von BAUMANN, SAUNDERS und ROBERTSHAW [89]. Der Balken befindet sich in einer unendlichen Schallwand und wird mit einer Impulsanregung zu Schwingungen angeregt. Es werden wahlweise ein oder zwei Aktoren verwendet, deren Eigenschaften nicht näher spezifiziert werden. Die Schallleistung wird auf gleiche Weise wie bei LEE und SINGH [42] bestimmt. In einer ähnlichen Arbeit zeigen NAGHSHINEH und KOOPMANN [90] am Beispiel eines Balkens in einer unendlichen Schallwand die Reduktion der abgestrahlten Schallleistung mittels auf dem Balken applizierter piezokeramischer Aktoren. Als Ergebnis wird u. a. angegeben, dass insbesondere Amplituden der Schwingwege an den Rändern der Struktur für die Reduktion der Schallabstrahlung maßgeblich scheinen. Die numerischen Ergebnisse werden außerdem anhand von Messungen an einem Balkenprüfstand verifiziert. Geregelt werden die Kräfte der piezokeramischen Flächenaktoren. Die nötigen Kräfte werden gewonnen, indem die Schallleistung aus der quadratischen Oberflächenschnelle abgeleitet wird, die proportional zu den in die Struktur eingeleiteten Kräften ist. Es handelt sich dabei um die Formulierung der Schallleistung, wie sie u. a. auch in [42–44] zu finden ist. NAGHSHINEH und KOOPMANN zeigen in [91] einen weiteren Ansatz, wobei diesmal nicht die Struktur, sondern die Fluid-Struktur-Kopplung über die Strahlungsmatrix, wie auch BORGIOTTI [42] sie angibt, zur Bestimmung der Schallleistung herangezogen wird. Dazu werden auf der Struktur an diskreten Positionen die oberflächennormalen Geschwindigkeiten bestimmt, die für die Schallabstrahlung relevanten Komponenten gefiltert und die jeweiligen Geschwindigkeiten geregelt.

Die aktive Regelung der Schallleistung im Nah- und Fernfeld (Real- und Imaginärteil) ist Gegenstand der Arbeit von LEE und PARK [92]. Darin wird explizit die Schallleistung als Regelziel verfolgt. Als Regelgröße wird die Oberflächenschnelle verwendet, wobei auch die Plattenauslenkung mit der Schallleistung verglichen wird. Es wird u. a. deutlich, dass die globale Minderung der abgestrahlten Schallleistung mit einer globalen Erhöhung des Schwingweges einhergehen kann. Auch CAZZOLATO und HANSEN [93, 94] verwenden die Oberflächenschnelle als maßgebliche Größe zur aktiven Erhöhung der Einfügungsdämpfung einer Sandwichstruktur [93] sowie zur aktiven Minderung der Schallabstrahlung einer Sandwichstruktur in ein akustisches Volumen [94].

JAKOB und MÖSER [95] zeigen die Reduzierung der abgestrahlten Schallleistung durch die aktive Beeinflussung schallabstrahlender Schwingungsmoden. Ein Teil der Ergebnisse entstammt der Dissertation von JAKOB [96]. Schallabstrahlende Schwingformen werden auch bei der aktiven Minderung der abgestrahlten Schallleistung einer Sandwichstruktur von BERKHOFF [97] behandelt. Dabei wird nach dem Prinzip vorgegangen, dass stark schallabstrahlende Schwingformen numerisch oder experimentell identifiziert und die Schwingungen in den zugehörigen Frequenzbereichen mit strukturkonform integrierten Aktoren reduziert werden. Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen den Schwingformen und der Schallleistung wird nicht hergestellt.

---

HEROLD zeigt die Gesamtsystemsimulation eines aktiven Struktursystems, wobei die Regelung der Reduzierung der Schallabstrahlung dient. Die Arbeit [98] enthält eine Literaturübersicht, die den Stand der Technik im Bereich aktiver Systeme mit dem Ziel der Lärm- und Schwingungsminderung zum damaligen Zeitpunkt (2003) ausführlich darlegt. Weitere Ergebnisse der Arbeitsgruppe, in der auch die Arbeit von HEROLD [98] entstand, finden sich bei WEYER [99] und VOGEL [100]. Darin wird u. a. die Schallleistung als Monitoring-Größe zur Beurteilung des Unterschiedes zwischen einem geregelten und einem ungeregelten System dargestellt. Als Regelgröße wird jedoch die Geschwindigkeit des von der schwingenden Struktur verdrängten Volumens verwendet. Die Herleitung der verwendeten Regelgröße wird von VOGL, HEROLD und WAHL [101] beschrieben. Darüber hinaus wird dort auch auf Erkenntnisse über die Schallabstrahlungscharakteristika bestimmter Schwingformen zurückgegriffen, wie sie von DEFFAYET und NELSON [102] sowie von JAKOB [95, 96] formuliert werden. Demnach strahlen gerade-gerade-Schwingformen von Rechteckplatten am geringsten in das akustische Fernfeld ab, während ungerade-ungerade- und ungerade-gerade-Schwingformen zu einer stärkeren Schallabstrahlung neigen. Es wird jedoch auch explizit auf die problematische Handhabung derartiger Formulierungen im praktischen Anwendungsfall verwiesen.

FRAANJE [103] legt den Schwerpunkt seiner Arbeit über Verfahren zur breitbandigen Lärm- und Schwingungsminderung auf die Regelungstechnik und geht dabei nicht explizit auf schallleistungsproportionale oder akustische Regelgrößen ein.

THOMAIER [104] stellt die Ergebnisse unterschiedlicher aktiver Eingriffe zur Schwingungsminderung am Beispiel eines Pkw vor. Dabei werden die Prinzipien eines aktiven Tilgers als Inertialmassenerreger sowie das Prinzip eines aktiven Lagers betrachtet. Die Arbeit befasst sich zwar auch mit akustischen Fragestellungen, erprobt werden aber AVC-Ansätze zur Schwingungsminderung.

KOZUPA und WICIAK [105] zeigen die Wirkung von ASAC mittels piezokeramischer Flächenaktoren im Vergleich zur passiven Maßnahme in Form eines Elastomerbelages am Beispiel einer Rechteckplatte auf. Als Regelgröße dient die Plattenbeschleunigung und als akustische Zielgröße die Einfügungsdämpfung der Platte. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Beschleunigungspegel nicht proportional zu den Pegeln der Einfügungsdämpfung sind. Auch von JANDA, STEIN und KONIGORSKI [106] werden piezokeramische Flächenaktoren aktiv angesteuert, um Plattenschwingungen zu reduzieren. Die Minderung der Schallabstrahlung wird zwar explizit erwähnt, eine schallleistungsproportionale Zielgröße wird jedoch nicht angegeben. Mit der aktiven Minderung der Schallabstrahlung des Panels eines Flugzeuges befasst sich GREBKOWSKI [107] in seiner Dissertation. Darin werden u. a. die unterschiedlichen aktiven Ansätze ANC, AVC und ASAC hinsichtlich ihrer Wirkung gegenübergestellt.

Einen Ansatz zur Schallleistungsminderung mit der Schallleistung als Regelgröße stellt JANDA [108] vor. Darin wird anhand eines modellbasierten Schätzers explizit die Schallleistung einer

---

schwingenden Platte bestimmt, die anschließend als Regelgröße verwendet wird. Die Schwingungskontrolle der Platte erfolgt dabei mit auf der Platte applizierten piezokeramischen Flächenaktoren. Eine ausführliche Darlegung der vorgestellten Ergebnisse findet sich außerdem in der Dissertation von JANDA [109].

Innerhalb der adaptronischen Systeme gibt es außerdem passive und semi-passive Systeme. Diese wandeln Strukturschwingungen in elektrische Energie, die anschließend dissipiert oder unter anderer Phasenlage wieder in mechanische Schwingungen gewandelt und in die Struktur eingeleitet wird. Der populärste Vertreter ist das *shunt damping*. ABOELSOUD [110] erläutert das Prinzip des *resonant shunt damping* ausführlich und stellt dessen Anwendung zur Schwingungsminderung dar. Einen allgemeineren und umfangreichen Überblick bietet NIEDERBERGER [111]. Er wendet das *shunt damping* zwar auf akustische Systeme an, jedoch anhand eines elektrodynamischen Wandlers (Lautsprecher) und nicht zur Strukturkontrolle.

DEÜ, LARBI und OHAYON [112] verwenden die Auslenkung als zu minimierende Größe, um die Schallabstrahlung einer Platte mittels *shunt damping* zu reduzieren. Dabei werden außerdem die Fluid-Struktur-Kopplung eines an die Platte angekoppelten Luftvolumens berücksichtigt und Möglichkeiten der Ordnungsreduktion werden vorgestellt. Die FE-Simulation einer Platte mit applizierten piezokeramischen Flächenaktoren, die zusammen mit elektrischen Komponenten als *shunt damping* ausgeführt sind, wird von NGUYEN und PIETRZKO [113] vorgestellt. Dabei werden die Auslenkungen der Plattenschwingungen reduziert und die Auswirkungen auf die Schallabstrahlung untersucht. Verbindliche Aussagen hinsichtlich eines allgemeinen schallleistungsproportionalen Entwicklungszieles werden nicht gemacht. Explizit wird die Schallleistung von GIUSEPPE, JOËL und FRANCESCO [114] zur Bewertung berücksichtigt, jedoch nicht als Auslenkungs- oder Regelziel.

SVENSSON [106] erwähnt ebenfalls das *shunt damping* als Ansatz zur Verbesserung des akustischen Verhaltens von Leichtbaustrukturen. Auch hier werden die Amplituden der Strukturschwingungen reduziert, ohne eine konkrete Korrelation zur abgestrahlten Schallleistung herzustellen. Auf die vergleichbaren, aber nicht identischen, Arbeiten von DEÜ, LARBI und OHAYON [115, 116] sei der Vollständigkeit halber ebenfalls hingewiesen.

Die Minderung des Schalldurchganges durch gekrümmte Glasplatten mit Hilfe von piezoelektrischen Aktoren wird von NOVÁKOVÁ, MOKRÝ und VÁCLAVÍK [117] behandelt. Darin wird ein aktives *shunt damping* mit negativer Kapazität appliziert, um die Auslenkungen in den ersten beiden Eigenmoden zu reduzieren. Die Schallleistung oder Schallabstrahlung wird darin nicht explizit behandelt.

Sowohl aktive als auch semi-passive Ansätze zur Lärm- und Schwingungsminderung am Beispiel einer Doppelglasfensterscheibe werden von HEUSS et al. [118–120] vorgestellt.



---

## 2.4 Handhabung der akustischen Anforderung *Schallleistung* im Produktentwicklungsprozess

---

Der Produktentwicklungsprozess sieht zu Beginn die Definition von Anforderungen vor, was in der *Planungsphase* geschieht. Dabei werden nach PAHL et al. [121] zu erfüllende Anforderungen in einer Anforderungsliste zusammengestellt und nach Prioritäten kategorisiert. Am Ende des Entwicklungsprozesses kann das fertige Produkt als eine Gesamtlösung aus entwickelten Teillösungen angesehen werden, die die gestellten Anforderungen am besten erfüllt. Die Teillösungen entstehen in einer einfachen, auf den jeweiligen Wirkprinzipien basierenden Form in der *Konzeptphase*. Sie werden aus den Funktionen generiert, die wiederum aus den Anforderungen abgeleitet werden. Um den Erfüllungsgrad zu bewerten, bedient man sich im Entwicklungsprozess unterschiedlicher Werkzeuge, die im Detail der einschlägigen Fachliteratur, wie z. B. PAHL et al. [121], entnommen werden können. In der folgenden *Entwurfsphase* werden die Lösungen gestalterisch konkretisiert. Es entstehen dimensionierte Entwürfe des Produktes. In der sich daran anschließenden *Ausarbeitungsphase* wird das Produkt fertig konstruiert und es entstehen die Konstruktions- und Montageunterlagen. Die Ausarbeitungsphase beinhaltet außerdem die Fertigung und Erprobung von Prototypen sowie die Produktion von Nullserien. Die Iterationen zur Produktverbesserung im Fall identifizierter Schwachstellen einer Neuentwicklung werden ebenfalls der *Ausarbeitungsphase* zugerechnet. Das prinzipielle Vorgehen sowie eine Sammlung von Methoden zur Findung und Bewertung von Lösungen finden sich auch in der VDI-Richtlinie VDI 2221 *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte* [26].

Die Berücksichtigung der Akustik erfolgt bereits in der Planungsphase. Dabei werden die akustischen Anforderungen für die darauffolgenden Entwicklungsschritte festgehalten. Für die Anforderung Schallleistung bedeutet das im Anwendungsfall, dass in der Regel eine Obergrenze festgelegt wird.<sup>6</sup> Diese sollte am Ende des Entwicklungsprozesses nicht überschritten werden.

Während der Produktentwicklung wird die Schallleistung, wenn überhaupt, erst in einer späten Phase des Entwicklungsprozesses quantifiziert. Häufig findet eine Quantifizierung auch nur dann statt, wenn die maximale Schallleistung entweder explizite Kundenanforderung, Wettbewerbsvorteil oder aber eine gesetzliche Vorgabe ist.

Erfolgt die Quantifizierung am Ende der Produktentwicklung, wird sie häufig messtechnisch an Prototypen oder Produkten der Nullserie ermittelt. Wird sie bereits in früheren Entwicklungsstadien der *Entwurfsphase* quantifiziert, erfolgt die Abschätzung in der Regel mittels numerischer Simulationen [3, 15, 17, 33]. Dazu werden üblicherweise CAD-Modelle der noch unvollständigen Produkte, Baugruppen oder Bauteile ohne konstruktive Details erstellt. Diese werden

---

<sup>6</sup> Die vorliegende Arbeit befasst sich explizit nur mit der Anforderung Schallleistung und nicht mit anderen akustischen Anforderungen, die in der Praxis existieren können. Nicht in jedem Fall wird eine maximal zulässige Schallleistung als Anforderung definiert.



---

dann mit einem FE-Programm diskretisiert und mit Materialparametern, Materialmodellen und Randbedingungen versehen. Anschließend erfolgen eine Anregung sowie die Berechnung des Oberflächenschnellefeldes, welches sich infolge der Erregung auf der Struktur oder dem Struktursystem einstellt. Die Anregung sollte dabei möglichst so gewählt werden, dass sie dem Lastkollektiv im späteren Betriebszustand entspricht. Da dieses Lastkollektiv im frühen Entwicklungsstadium häufig aber nicht oder nur unzureichend bekannt ist, dienen in der Regel Anregungen in Form harmonischer Kräfte oder Verschiebungen als Anregungsszenarien. Man regt die jeweilige Struktur dann entweder mit einer bestimmten Frequenz oder schrittweise an bestimmten Frequenzstützstellen an. Alternativ können auch sprung- oder stoßförmige Erregungen simuliert werden.

In frühen Entwicklungsphasen ist eine Abschätzung der Schallleistung allerdings problematisch. Da sich einerseits die Randbedingungen, z. B. die Lagerung eines flächigen Bauteils, und andererseits auch die Orte der Anregungen noch ändern können, entstehen mit jeder Änderung unterschiedliche Schnellefelder auf der Bauteiloberfläche. Folglich ändert sich auch das Abstrahlverhalten des Bauteils und infolge dessen die abgestrahlte Schallleistung. Eine weitere Herausforderung, besonders in frühen Entwicklungsstadien, ist die Modellierung der Dämpfungsmechanismen. Die Dämpfung hat einen maßgeblichen Einfluss auf das resultierende Schnellefeld und kann in frühen Entwicklungsphasen ohne experimentelle Absicherung nur als Schätzung angenommen werden. Im Falle von flächigen Strukturbauteilen aus metallischen Werkstoffen dient dazu regelmäßig die Annahme eines schwach gedämpften Systems mit konstanter Dämpfung. Unter Vernachlässigung dämpfender Mechanismen in Form von Lagerungen oder Applikationen ist diese Annahme häufig gerechtfertigt. Für eine korrekte Berechnung der abgestrahlten Schallleistung, die einer späteren messtechnischen Überprüfung standhält, ist dieses Vorgehen aber häufig nicht ausreichend. Die Annahme eines schwach gedämpften Systems mit einer niedrigen konstanten Dämpfung dient dann als Ergebnis zur Abschätzung in Form einer oberen Schranke.

In der *Ausarbeitungsphase* stehen bereits detaillierte Produkt-Modelle zur Verfügung. Diese erlauben auch eine detailliertere Modellierung zur Simulation akustischer Größen sowie den Bau von Prototypen. Bei der numerischen Simulation ist auch dann, wenn detaillierte Modelle vorliegen, die Durchführung von Akustiksimulationen keine triviale Aufgabe, und die Ergebnisse von Schallleistungssimulationen sind häufig nur qualitativ bewertbar. Ursächlich dafür sind die komplexe, oben bereits beschriebene, Handhabung der Dämpfung und häufig nicht oder nur unvollständig vorliegende Materialmodelle. Dennoch erlauben die erzielten Simulationsergebnisse häufig einen Vergleich unterschiedlicher Lösungen.

Anstelle der Simulation der abgestrahlten Schallleistung werden, insbesondere in der Automobilindustrie, die mittlere quadratische Oberflächenschnelle oder die äquivalente Strahlungsleistung  $P_{\text{ERP}}$  simulativ berechnet. Das hat den Vorteil, dass lediglich die Strukturantwort berechnet werden muss, was in der Praxis bedeutet, dass die Simulationsdauer erheblich geringer ausfällt

---

als im Falle von Luftschallsimulationen. Berücksichtigt man die Aussage- und Prognosequalität von Schallleistungssimulationen, ist diese Vereinfachung aus praktischen Gründen jedoch häufig gerechtfertigt.

Liegen hingegen Prototypen vor, kann die Schallleistung messtechnisch ermittelt und auf die im Pflichtenheft festgehaltenen Höchstwerte hin überprüft werden. Wird die Anforderung Schallleistung nicht eingehalten, müssen akustische Schwachstellen des Produktes identifiziert und eliminiert werden. Die aufwändige Bestimmung der Schallleistung bleibt auch in diesem Fall bestehen.

Bei vielen heutigen Produkten handelt es sich um mechatronische Produkte. Für ihre Entwicklung wurden spezielle Vorgehensweisen erarbeitet. Diese sind in knapper Form inklusive Literaturverweisen in der VDI-Richtlinie VDI 2206 *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme* [4] zusammengefasst. Zwar wird darin nicht auf akustische Anforderungen eingegangen, dafür aber auf den Einsatz numerischer Simulationswerkzeuge, mit deren Hilfe auch akustische Größen bestimmt werden können. Das zentrale Element der Entwicklungsmethodik ist das V-Modell, welches aus der Softwareentwicklung übernommen und angepasst wurde. Dieses Modell muss als Entwicklungszyklus verstanden werden, der solange durchlaufen wird, bis alle Anforderungen bestmöglich erfüllt sind. Charakteristisch dabei ist weiterhin, dass zwischen einem Systementwurf und dem domänenspezifischen Entwurf unterschieden wird. Das bedeutet einerseits, dass der Entwurf von integrierten Teilsystemen hoher Komplexität erst erfolgt, wenn das Gesamtsystem bereits einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand aufweist. Andererseits erlaubt der domänenspezifische Entwurf, auch wenn es nicht explizit benannt wird, die eigenständige Berücksichtigung der Akustik. So wäre es beispielsweise vorstellbar, dass nach einem groben Systementwurf die schallabstrahlenden Oberflächen dahingehend ausgelegt werden, dass unter gegebenen Randbedingungen eine möglichst geringe Schallabstrahlung erfolgt, z. B. durch den Einsatz von Strukturoptimierungswerkzeugen. Auch die Erregungen der schallabstrahlenden Struktur selbst können z. B. durch den Einsatz von Magnetlagern reduziert werden. Dennoch bleibt auch in diesen Fällen die Problematik des fehlenden Auslegungskriteriums für eine möglichst geringe Abstrahlung von Schallleistung.

Die Entwicklung komplexer Systeme, wie es mechatronische Systeme sind, erfordert in weiten Teilen einen modellbasierten Systementwurf. So werden die Anforderungen in Anforderungsmodellen modelliert, Beschreibungsmodelle (z. B. CAD-Modelle) beschreiben die Gestalt des Systems und die Verhaltensmodelle das Systemverhalten in den jeweiligen Domänen. Akustische Systemgrößen werden folglich mit akustischen Modellen beschrieben, die FE-Modelle und BE-Modelle oder auch abgeleitete mathematische Modelle sein können (Meta-Modelle, Ersatzmodelle), die das Systemverhalten in Abhängigkeit von bestimmten Eingangsgrößen beschreiben. Durch den Einsatz dieser Modelle werden außerdem der Einsatz von Optimierungswerkzeugen sowie die Identifikation von treibenden Entwicklungsparametern, z. B. durch den Einsatz von Sensitivitätsanalysen, möglich.

---

Im Kontext des modellbasierten sowie des domänenspezifischen Systementwurfs sind auch die in späteren Abschnitten vorgestellten Methoden, die in dieser Arbeit entwickelt werden, einzuordnen. Eine Weiterentwicklung des V-Modells für adaptronische Systeme stellt das W-Modell von ANDERL und NATTERMANN [122, 123] dar. Darin wird die virtuelle Produktentwicklung in den Vordergrund gestellt, wobei die domänenspezifischen Simulationen wesentliche Elemente sind. Das im letzten Abschnitt der vorliegenden Arbeit vorgestellte Konzept eines selbst lernenden Systems kann als automatisiertes, domänenspezifisches Element betrachtet werden, welches im Rahmen der integrierten, virtuellen Produktentwicklung eingesetzt werden kann.

Insbesondere Simulationswerkzeuge sind heute nahezu überall etablierte Werkzeuge, und in der Produktentwicklung kann ihr Einsatz als Stand der Technik angesehen werden. Der Modellbildung und Simulation akustischer Größen kommt demzufolge eine besondere Bedeutung zu.

Bei der numerischen Simulation akustischer Größen, wie Schallschnelle- und Schalldruckfeldern und der abgestrahlten Schallleistung, kommt auf der Strukturseite in der Regel<sup>7</sup> die FEM zum Einsatz, und zur Berechnung von Luftschallgrößen, die in den Außenraum abgestrahlt werden, wird meist die BEM verwendet. Durch den Einsatz numerischer Werkzeuge kann auch die vollständige Fluid-Struktur-Interaktion berücksichtigt werden.

Ebenfalls möglich ist die Berechnung der Luftschallgrößen aus Körperschallgrößen mittels der Punktstrahlersynthese, wie z. B. bei HEROLD [98]. Prinzipiell können einfache geometrische Probleme auch durch das Lösen gekoppelter analytischer Gleichungssysteme berechnet werden. Derartige analytische Ansätze stellen jedoch in der Praxis untaugliche Ansätze dar, da sowohl die Problemformulierung als auch die Lösungen der das Problemgebiet beschreibenden Differenzialgleichungssysteme eine hochkomplexe Aufgabe darstellen.

---

<sup>7</sup> Prinzipiell können akustische Größen auch ausschließlich mit der Finite-Elemente-Methode oder der Randelemente-Methode berechnet werden.

---

## 2.5 Einordnung der vorliegenden Arbeit und Forschungsgegenstand

---

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der methodischen Ableitung von Regeln zur Berücksichtigung der abgestrahlten Schallleistung im Entwicklungsprozess, bei der Optimierung technischer Systeme und bei der Auslegung aktiver Systeme. Derzeit fehlen verbindliche Regel- oder Konstruktionsziele, welche eine schallleistungsproportionale Bewertung einer Lösung im Produktentwicklungsprozess ermöglichen.

Bisherige Arbeiten<sup>8</sup> zeigen, dass eine Einordnung von Schwingformen in schallabstrahlende und schwach abstrahlende<sup>9</sup> Schwingformen prinzipiell möglich erscheint. Es wurde auch gezeigt, dass der Ansatz, Strukturschwingungen (Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg) generell zu mindern, nicht automatisch mit einer akustischen Verbesserung einhergeht. Allerdings fehlen Generalisierungen hinsichtlich der Fragestellung, in welchen Fällen die Minderung von Strukturschwingungen zur Minderung der Schallabstrahlung führt. Arbeiten aus dem Bereich der Optimierung oder das Vorgehen im Entwicklungsprozess in der industriellen Praxis zeigen, dass sich gewisse Verfahrensweisen etabliert haben. Allerdings liegt in vielen Fällen die Begründung zum Vorgehen im Mangel an der Zugänglichkeit des Abstrahlgrades oder aber die Begründungen ergeben sich aus den Formulierungen der zugrunde gelegten Problemstellungen. Eine Erarbeitung von Regeln für die Charakterisierung der Schallabstrahlung einzelner Schwingformen erscheint aus den genannten Gründen sinnvoll. Daher werden, unter Berücksichtigung der eingangs gemachten Einschränkungen, die folgenden Forschungsfragen formuliert:

- I. *„Lassen sich allgemeingültige Metriken für Schwingformen flächiger Strukturen angeben, die besonders stark oder besonders schwach Schall in die Umgebung abstrahlen?“*
- II. *„Welche Zielfunktionen, Auslegungsziele und Regelgrößen sind zweckmäßigerweise auf flächige Strukturen anzuwenden, wenn die Minderung der abgestrahlten Schallleistung das Ziel ist?“*

Die Ableitung von generalisierbaren Regeln wird außerdem durch die Arbeiten von KOLLMANN, MÜLLER und WEBER [52, 53] motiviert, welche zeigen, dass für geometrisch ähnliche Strukturen Modellgesetze gelten, die eine Ergebnistransformation bestimmter akustischer Größen erlauben.

Zur Erarbeitung der Forschungsfragen sollen Techniken der Datenanalyse verwendet werden, das *Data-Mining*. Die Begründung für dieses Vorgehen ergibt sich aus dem Stand der Forschung und den Forschungsfragen selbst. So gibt es stark schallabstrahlende und weniger stark

---

<sup>8</sup> Beispielsweise geben BORGIOTTI [42] und CUNEFARE [43] Ergebnisse an, die diesen Schluss rechtfertigen.

<sup>9</sup> Im englischen Sprachraum werden diese schwach abstrahlenden Schwingformen als *weak radiator modes* bezeichnet.

---

schallabstrahlende Schwingformen, wobei sich das Wissen darüber auf akademische Beispiele (z. B. Rechteckplatten) beschränkt und eine Übertragung auf andere Problemstellungen nur unter bestimmten Rahmenbedingungen möglich ist. Als weitere Begründung ist die schlechte Generalisierbarkeit und Vergleichbarkeit von Ergebnissen anzuführen. Dies hat in Anlehnung an MAY und KOHLHAMMER [124] hauptsächlich zwei Ursachen:

1. Die Komplexität der Problemstellung ist so hoch, dass eine vollständige analytische Beschreibung und Interpretation der Beschreibung (z. B. Überprüfung von Hypothesen) nicht möglich ist.
2. Die nicht ausreichend effektive Handhabung der verfügbaren Daten sowie fehlendes Wissen über die Relevanz verfügbarer Daten und möglicherweise unbekannte Informationen.

Insbesondere die unter 1. genannte Ursache wiegt im Fall der Berücksichtigung der Schallabstrahlung im Produktentwicklungsprozess schwer. Analytische Beschreibungen für reale Produkte fehlen häufig, und Zusammenhänge zwischen Strukturschwingungen und Schallleistung können nur mit erheblichem Aufwand identifiziert werden. Außerdem sind sie anschließend meist nicht generalisierbar. Die mangelnde Generalisierbarkeit vieler Ergebnisse ist auch dahingehend ein Problem, dass sie nicht als Auslegungsregeln im Rahmen der allgemeinen akustischen Produktentwicklung dienen können.

Wie unter 2. aufgeführt, ist auch der Mangel an einer effektiven Handhabung von vorliegenden Daten im Bereich der Akustik bisher ein Problem. Dabei spielt ebenfalls die Problematik der Vergleichbarkeit von Daten eine Rolle. Insbesondere akustische Größen schwanken selbst bei gleicher Geometrie stark, wenn sich die Randbedingungen nur leicht ändern. Auch das teilweise Fehlen von Informationen (z. B. die Randbedingungen wurden nicht sauber dokumentiert) führt heute teilweise dazu, dass Daten von Messungen und Simulationen nicht miteinander vergleichbar sind.

Statistische Methoden, wie sie beim *Data-Mining* angewendet werden, erlauben neben der Analyse vergleichbarer Datensätze auch das Zusammenführen unterschiedlicher Daten oder Datenmengen zur Informationsgewinnung. Daher liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Ableitung von Regeln mit Hilfe von Methoden des *Data-Mining*.

---

### 3 Data-Mining und Wissensmodellierung in der Maschinenakustik

---

In diesem Kapitel wird eine Methode beschrieben, welche die Handhabung der Systemgrößen im Entwicklungsprozess mit dem Ziel der Schalleistungsminderung in Relation zueinander darstellt. Dabei wird auf Werkzeuge des Data-Mining zurückgegriffen, um Regeln und Muster zu erkennen. Die Nutzung des so gewonnenen Wissens mit Hilfe von Techniken der Wissensmodellierung (engl.: *knowledge engineering*) wird ebenfalls erörtert. Im Mittelpunkt der Mustererkennung stehen dabei die in Abschnitt 2.5 formulierten Forschungsfragen.

Um den Nutzen eines Data-Mining-Prozesses im Kontext dieser Arbeit zu verdeutlichen, dient die nachfolgend skizzierte Idealvorstellung einer regelbasierten Bewertung und Nutzung von Schwingformen. Zunächst werden in einem ersten Schritt Regeln oder Modelle aus erkannten Mustern abgeleitet, die dann in einem zweiten Schritt verwendet werden können. Darin werden anfangs mit generischen Geometrien, wie z. B. Platten, Simulationen durchgeführt und so Datensätze generiert, die aus Geometrie, Materialeigenschaften, Randbedingungen (inklusive Anregung) sowie Simulationsergebnissen bestehen. Anhand der Ergebnisse können Regeln abgeleitet und in einer Modellbibliothek verfügbar gemacht werden. Dieser Prozess der Regelableitung ist in Abbildung 3-1 skizziert.

#### Regelableitung

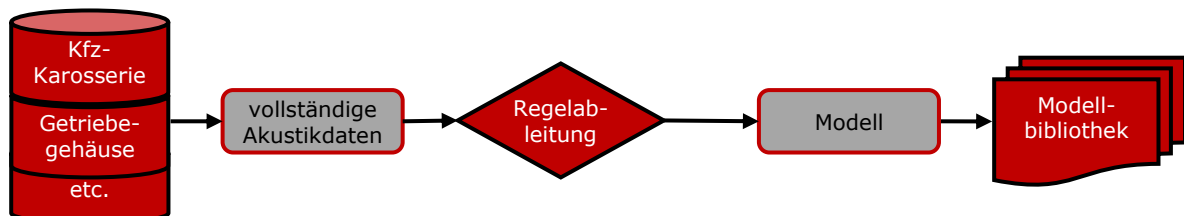


Abbildung 3-1: Vorgehen zur Erzeugung einer Modellbibliothek

Ein Anwender kann Simulations- oder Messergebnisse oder Angaben eines Kunden oder Zulieferers anhand der Modellbibliothek bewerten und daraus einen Schätzwert der abgestrahlten Schalleistung abgeben. Dieser Schätzwert kann im Entwicklungsprozess bewertet werden. Dieser Prozess ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

#### Anwendung

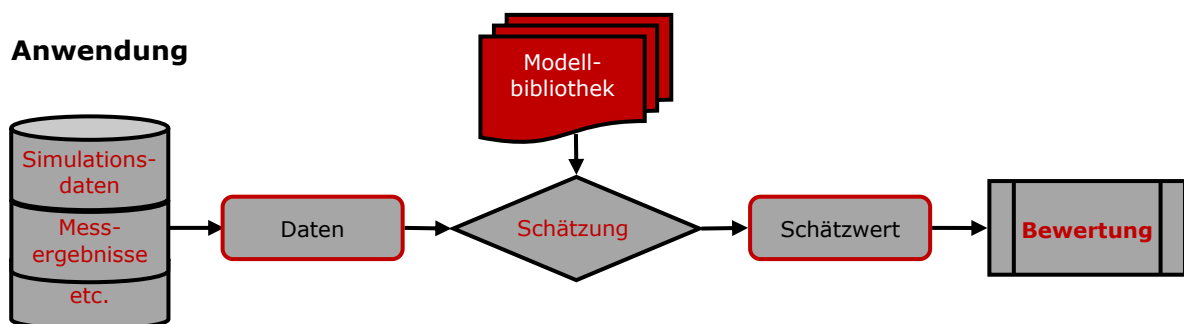


Abbildung 3-2: Vorgehen zur Anwendung von erkannten Regeln

---

Einschränkend sei angemerkt, dass ein derartiges Vorgehen eine Idealvorstellung darstellt und als Fernziel zukünftiger Arbeiten betrachtet werden kann. Das in Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 skizzierte Vorgehen basiert im Wesentlichen auf den Vorstellungen des maschinellen Lernens, wie sie bspw. in [125–129] erläutert werden.

---

### 3.1 Data-Mining als Prozess

---

Unter Data-Mining wird im Allgemeinen eine Vielzahl von Datenanalyseverfahren verstanden, mit denen Muster in vorliegenden Daten erkannt und Regeln abgeleitet werden können. Ein wesentliches Merkmal von dem Data-Mining zuzuordnenden Verfahren ist, dass die Datenanalyse nicht die Verifikation von Hypothesen zum Ziel hat, sondern vielmehr eigene Hypothesen generiert werden. Charakteristisch für Data-Mining ist also das Ziel der Mustererkennung bei gleichzeitiger Hypothesenfreiheit [130]. Während man bei Datenanalyseaufgaben mit dem Ziel der Verifikation von Hypothesen von Top-Down-Problemen spricht, werden die Aufgabenstellungen beim Data-Mining auch als Bottom-Up-Probleme bezeichnet [131]. Streng genommen können Bottom-Up-Probleme nicht losgelöst von Top-Down-Problemen betrachtet werden, da im Idealfall die erkannten Muster und daraus abgeleiteten Hypothesen bestätigt werden sollten. Dieser Sachverhalt wird in der Fachwelt kritisch diskutiert. Ebenfalls kritisch diskutiert werden auch die vielen Varianten, nach denen der gesamte Analyseprozess strukturiert werden kann, sowie der Begriff Data-Mining selbst. Eine kritische Auseinandersetzung, die sich diesem Themenkomplex widmet, liefern KNOBLOCH und WEIDNER [132]. Gemeinsame Auffassung der unterschiedlichen Autoren ist, dass das eigentliche Data-Mining nur der Analyseschritt im Rahmen eines ganzen Prozesses ist. Weitere wichtige Teilschritte in einem möglichen Prozess sind insbesondere die Datenaufbereitung und die Ergebnisinterpretation. Derartige Prozesse werden unter der Bezeichnung *Knowledge Discovery in Databases* (KDD) zusammengefasst [130, 132]. Um KDD-Prozesse zu vereinheitlichen und um die Wissensentdeckung reproduzierbar zu gestalten, wurde im Rahmen eines von der EU geförderten Projektes der *Cross-Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) entwickelt [133]. Neben CRISP-DM wurden weitere KDD-Prozesse publiziert, die sich bei Anwendern (international) jedoch nicht durchsetzen konnten. Da man CRISP-DM folglich als weltweit verbreiteten Standard für Data-Mining-Prozesse betrachten kann [134], dient er im Rahmen dieser Arbeit als Grundlage für den Analyseprozess zur Ableitung schallleistungsproportionaler Merkmale. CRISP-DM integriert außerdem abgeleitete Hypothesen und deren Überprüfung (Bottom-Up- und Top-Down-Probleme) durch ein iteratives Vorgehen im Rahmen eines Kreislaufes.

CRISP-DM beschreibt einen KDD-Prozess als Kreislaufprozess, wobei dieser sich nicht auf konkrete Anwendungsfelder bezieht und werkzeugunabhängig ist. Der Prozess selbst besteht aus sechs Phasen und sieht explizit Iterationen zwischen den einzelnen Phasen vor, sollten diese nötig sein. Er ist in Abbildung 3-3 auf der folgenden Seite veranschaulicht. Für eine vollständige Beschreibung sei auf [133] verwiesen.



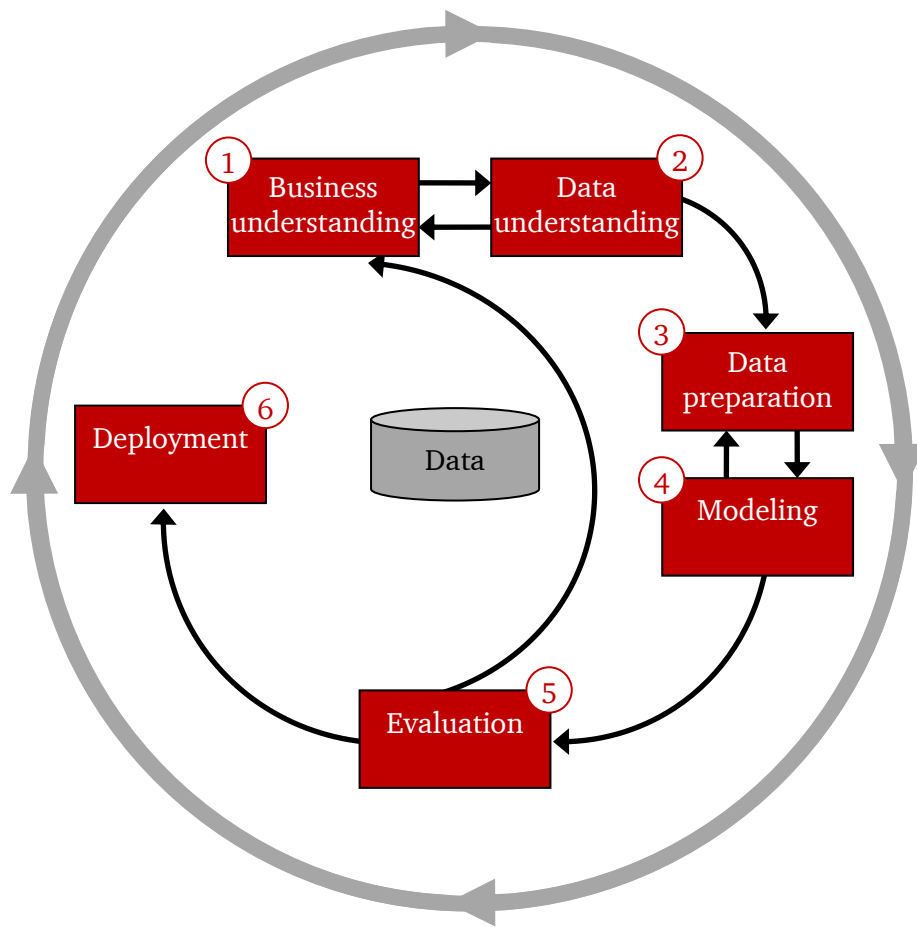


Abbildung 3-3: CRISP-DM-Kreislauf nach CHAPMANN et al. [133]

|   |                              |   |
|---|------------------------------|---|
| ① | <b>Problem-spezifikation</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problembeschreibung</li> <li>• Spezifikation der Ziele</li> <li>• Definition von Kriterien zur Ergebnisevaluation</li> </ul>   |
| ② | <b>Daten-beschaffung</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifikation geeigneter Datenquellen</li> <li>• Integration verfügbarer Daten</li> </ul>   |
| ③ | <b>Daten-aufbereitung</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erkennung und Korrektur fehlerhafter und fehlender Daten</li> <li>• Identifikation von Korrelationen</li> <li>• Auswahl der Data-Mining-Methode</li> <li>• Bereitstellung der Daten für das eigentliche Data-Mining</li> </ul> |
| ④ | <b>Data-Mining</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ableitung eines deskriptiven oder prädiktiven Modells</li> <li>• Ergebnisevaluation</li> <li>• Initiierung einer möglicherweise nötigen Iteration</li> </ul>   |
| ⑤ | <b>Muster-evaluation</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• statistische Ergebnisauswertung</li> <li>• Interpretation der statistischen Kennzahlen</li> </ul>  |
| ⑥ | <b>Anwendung</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ableitung von Handlungsanweisungen</li> <li>• Umsetzung der Handlungsanweisungen</li> </ul>  |

Abbildung 3-4: Inhalte der Phasen des CRISP-DM-Kreislaufes nach [133]



---

Abbildung 3-4 zeigt eine anwendungsunabhängige Übersicht über die in den jeweiligen Phasen zu bewältigenden Aufgaben. Auf die Problemstellung der vorliegenden Arbeit bezogen, ergeben sich in den einzelnen Phasen nach CRISP-DM [133] die folgenden Aufgaben:

***Phase 1: Business understanding (Problemspezifikation)***

Zu Beginn sieht der CRISP-DM-Kreislauf die *business understanding* genannte Phase vor. Darin ist zunächst das übergeordnete Ziel der Datenanalyse und Hypothesenfindung zu definieren. Anschließend müssen das Data-Mining-Ziel definiert sowie Kriterien zur Bewertung des Prozesses festgelegt werden.

Bei der Produktentwicklung unter Berücksichtigung der akustischen Anforderung Schallleistung ist die Problemstellung, dass handhabbare Gesetzmäßigkeiten gesucht werden, welche die Abstrahlung von Schallleistung in Abhängigkeit von zugänglichen Systemeigenschaften oder Systemzuständen beschreiben. Das Ziel ist die Minderung der abgestrahlten Schallleistung und entspricht damit dem klassischen Ziel des geräuschgerechten oder lärmarmen Konstruierens [15, 33]. Dazu sind die in Abschnitt 2.5 formulierten Forschungsfragen zu beantworten.

***Phase 2: Data understanding (Datenbeschaffung)***

Die Phase *data understanding* dient der Untersuchung der zur Verfügung stehenden Daten. Neben der Qualitätsprüfung finden außerdem die Identifikation (noch keine Elimination) von Fehlern im Datenbestand sowie eine Plausibilitätsprüfung statt. In dieser Phase erfolgt außerdem die Integration der Daten in das genutzte Datenverarbeitungssystem. Möglicherweise müssen in diesem Schritt auch Daten verworfen oder bestimmte Vorkehrungen getroffen werden, sofern es sich um sensible Daten (Datenschutz, Geheimhaltung etc.) handelt.

Sämtliche Informationen müssen durchsuchbar, zugänglich und nutzbar gemacht werden. Außerdem ist zu überprüfen, ob die Daten fehlerbehaftet sind und auf welche Weise die Fehler berücksichtigt werden können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dienen Simulationsergebnisse eines numerischen Experiments als Datenbasis. Auf diese Weise ist einerseits sichergestellt, dass alle Datensätze unter gleichen Rahmenbedingungen erzeugt wurden und mit den gleichen Fehlern behaftet sind. Gleichzeitig ist sichergestellt, dass alle Randbedingungen eindeutig beschrieben und Verwechslungen (bspw. durch fehlerhafte oder nicht eindeutige Benennung vorhandener Daten) ausgeschlossen sind. Das numerische Experiment ist in Abschnitt 4 beschrieben. Ebenfalls zu identifizieren ist, unter welchen Rahmenbedingungen die verfügbaren Daten erzeugt wurden.

***Phase 3: Data preparation (Datenaufbereitung)***

In dieser Phase findet die Datenaufbereitung statt, wobei darunter neben der Erkennung und Beseitigung von Fehlern und Ausreißern auch die Durchführung von Korrelationsanalysen vorgesehen ist. Dazu gehören insbesondere auch das Auffüllen von fehlenden Werten und das Festlegen der zu verwendenden Variablen. Auch das Modellieren von abgeleiteten Größen (Transformation) oder das Anpassen (z. B. mittels resampling) von Daten kann Bestandteil

---

dieser Phase sein. Außerdem wird die Analysemethode für das eigentliche Data-Mining festgelegt und die zu untersuchenden Daten werden in geeigneter Weise bereitgestellt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Daten für die Erprobung der Methode aus für diese Aufgabe durchgeführten numerischen Experimenten verwendet. Daher kommt dieser Aufgabe an dieser Stelle keine gewichtige Bedeutung zu, was aber nur explizit für den vorliegenden Fall gilt. Alle nötigen Daten liegen vollständig vor, und das Wissen über Herkunft und Art der Daten kann als gesichert angenommen werden.

Eine wichtige Aufgabe innerhalb dieser Phase ist die Überprüfung vorliegender Daten auf möglicherweise vorhandene Korrelationen. Damit können zwei Aspekte der Interpretation der vorhandenen Daten qualifiziert werden. Einerseits müssen Korrelationen im Falle von zu erwartenden Zusammenhängen existieren. Liegen in diesen Fällen keine Korrelationen vor, so kann das darauf hindeuten, dass der Datenbestand entweder fehlerhaft ist oder aber die Daten aus einer fehlerhaften Quelle (Messfehler oder Fehler im Simulationsmodell) stammen. Alternativ könnte auch die Erwartung (Hypothese) falsch sein. Finden sich weitere Korrelationen im Datenbestand, können diese Erkenntnisse später zur Interpretation genutzt werden. Außerdem können diese Informationen für die spätere Modellierung relevant sein.

Phase 3 schließt mit der Festlegung der Modellierungsmethode für das eigentliche Data-Mining in der nächsten Phase.

#### ***Phase 4: Modeling (Data-Mining)***

Der vierte Schritt umfasst das eigentliche Data-Mining, wozu insbesondere die Erstellung des Analysemodells, die Datenanalyse und die Ergebnisevaluation gehören. In diesem Schritt erfolgt die Auswahl der Modellierungstechnik, die maßgeblich von dem Ziel der Datenanalyse sowie von den zur Verfügung stehenden Daten abhängt. Dabei muss darauf geachtet werden, ob es sich um prädiktive oder deskriptive Modellbildung handeln soll.

Dazu wird zunächst ein Modellierungsverfahren aus der Gruppe der zuvor definierten Modellierungsmethoden gewählt. Dann werden, unter zu treffenden Annahmen, ein oder mehrere Modelle anhand ausgewählter Daten abgeleitet und Simulationsergebnisse erzeugt. Dabei unterscheidet man im Wesentlichen zwischen den Modellierungsmethoden Klassifikation und Regression. In der Literatur finden sich weitergehende Unterscheidungen, dabei ist jedoch anzumerken, dass es sich dabei lediglich um Unterverfahren der beiden genannten Modellierungsmethoden handelt. So handelt es sich beim Clustering um eine unüberwachte Klassifikation und bei einer Funktionenapproximation<sup>10</sup> um eine Regressionsaufgabe. Auch bei Assoziations- oder Entscheidungsbaumverfahren handelt es sich um Formen der Klassifikation.

---

<sup>10</sup> Der Sonderfall einer Interpolationsaufgabe zur Funktionenapproximation stellt streng genommen eine von der Regression zu unterscheidende Aufgabe dar.

---

Ziel der Modellerzeugung und Simulation der Daten ist die Erkennung von Mustern oder die Ableitung von Regeln, die neben der Analyse vorliegender Datensätze auch eine Prognose der Eigenschaften neuer (zukünftiger) Datensätze erlauben.

#### ***Phase 5: Evaluation (Musterevaluation)***

Im Anschluss an die in Phase 4 durchgeführte Mustererkennung erfolgt in Phase 5 deren Evaluation anhand der Kriterien, die in Phase 1 festgelegt wurden. Dabei kommen statistische Methoden zum Einsatz.

Es ist außerdem eine Prüfung der Ergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität und ihrer Konsistenz durchzuführen, um mögliche Widersprüche in der Kausalkette oder Fehler der verwendeten Modellierungen zu identifizieren. Modellierungsfehler können sowohl fehlerhafte oder ungeeignete Modelle selbst oder aber fehlerhafte Annahmen und Randbedingungen sein. Im Fall einer fehlerhaften Modellierung oder beim Vorliegen von Inkonsistenzen oder Widersprüchen in der Kausalkette muss eine Iteration durchgeführt werden, die bis hin zu einer erneuten Initiierung des gesamten Prozesses mit dem erneuten Durchlauf beginnend ab Phase 1 reichen kann.

Ebenfalls in dieser Phase erfolgt die Identifikation der nächsten Schritte. Diese können, wie bereits erwähnt, Iterationen oder das Ableiten von konkreten Handlungsanweisungen sein. Sofern keine Iterationen erforderlich sind, erfolgt der Übergang in die nächste Phase und die damit verbundene Ableitung von Handlungsanweisungen.

#### ***Phase 6: Deployment (Anwendung)***

Am Ende des Prozesses stehen im sechsten Schritt die Ableitung von Handlungsanweisungen, die Umsetzung von Maßnahmen sowie die abschließende Dokumentation. Wesentlich dabei ist, dass die interpretierten Ergebnisse für die Zielgruppe der späteren Anwender aufbereitet und Handlungsanweisungen daraus abgeleitet werden. Streng genommen wird die Nutzung der abgeleiteten Regeln auch der letzten Phase zugeordnet. Für die Qualitätssicherung bei einer dauerhaften Anwendung der abgeleiteten Handlungsanweisungen ist auch eine optionale Festlegung von Tests in Form eines Wartungsplans Bestandteil der letzten Phase.

Eine praktische Umsetzung des oben beschriebenen Prozesses mit dem Ziel der Beantwortung der eingangs gestellten Forschungsfrage folgt in Kapitel 4. Aufgrund der zentralen Stellung sowie der Wichtigkeit im Rahmen dieser Arbeit werden in den nächsten Abschnitten die Analysemethoden des Data-Mining sowie die Handhabung der genutzten Daten erläutert. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Verfahren werden anschließend erörtert.

---

### 3.2 Wissensmodellierung auf Basis akustischer Mess- und Simulationsergebnisse

---

Data-Mining als Prozess erfordert an mehreren Stellen das Modellieren von Wissen. So erfolgt insbesondere in *Phase 2* (Implementierung der Daten) sowie in *Phase 6* (Anwendung) des skizzierten Data-Mining-Prozesses eine Handhabung und Verarbeitung von Daten, die eine Wissensmodellierung darstellt.

Streng genommen setzt jede Form der Speicherung, Verarbeitung und Interpretation von Mess- und Simulationsdaten eine Form der Wissensmodellierung voraus [135]. Dabei wird in kleinen Organisationen in der Regel kein spezielles System verwendet. Messergebnisse werden auf Datenträgern gemeinsam mit möglicherweise angefertigten Protokollen der jeweiligen Messungen gespeichert. Gleiches gilt für Simulationsergebnisse, wobei hier in der Regel die Informationen, die sich im Fall von Messergebnissen in einem Protokoll finden, Teil der Modellierung selbst sind. Moderne Mess- und Simulationsumgebungen bieten softwareseitig Notizbuchfunktionen für derartige Protokollierungsaufgaben an. Um eine Übersicht über die erzeugten Daten zu erhalten, ist das Führen von einfachen Tabellen in der Praxis die vermutlich verbreitetste Variante der Dokumentation.

Größere Organisationen verfügen teilweise über Wissensmanagement-Systeme, die eine strukturierte Speicherung erzeugter Daten, wenigstens ansatzweise, ermöglichen sollen. Allerdings werden derartige Systeme nur selten um die Funktionalität des Zugangs zu Mess- und Simulationsergebnissen erweitert oder in diesem Kontext angewandt. Vielmehr zeugen Erfahrungen von Experten aus der industriellen Praxis, wie sie z. B. von HUBER [136] geschildert werden, davon, dass erzeugte Daten von Mitarbeitern, die das Unternehmen verlassen, anschließend kaum noch Verwendung finden. So können nur zugängliche (strukturierte und durchsuchbare) Information als nutzbares Wissen angesehen werden. Umso wichtiger ist eine strukturierte Speicherung und Aufbereitung von Daten, insbesondere von Mess- und Simulationsdaten.

Eine Möglichkeit zur strukturierten Wissensaufbereitung, die sich in einer zeitgemäßen XML-Struktur abbilden lässt, stellt die Verwendung von *Topic Maps* im Sinne der ISO/IEC 13250 [137] dar. Darin werden Informationen, wie z. B. Simulations- oder Messdaten, in einer technisch kontextuellen Struktur zugeordnet und gespeichert. Diese Art der Datenspeicherung erlaubt Experten den Zugang zu Informationen, welche ingenieurtypisch aufbereitet wurden. Aufgrund der Strukturierung können Informationen anhand von Meta-Daten abgefragt werden. Eine semantische Suche oder eine Verarbeitung, wie sie von Systemen der künstlichen Intelligenz erfolgt, erlauben *Topic Maps* nur in einem begrenzten Maße.

---

Alternative Ansätze auf der Basis von Ontologien<sup>11</sup>, wie sie beispielsweise auch aktuell bei der Entwicklung des *Semantic Web* Anwendung finden, stellen dafür die mächtigeren und somit geeigneteren Ansätze dar [138-140]. Dabei werden Informationen nicht hierarchisch organisiert, sondern anhand von Relationen abgebildet. Informationen können bspw. über ein *Resource Description Framework* (RDF) beschrieben werden, was semantische Aussagen zu Eigenschaften eines Datensatzes, unabhängig von nicht abgefragten Randbedingungen, ermöglicht.

Auch im Falle eines RDF werden die Informationen eines Datensatzes als Meta-Daten organisiert, was i. d. R. als Repräsentation in XML-Syntax erfolgt. In einem RDF wird jeder Datensatz als *Ressource* (engl. resource) mit einer eindeutigen Bezeichnung beschrieben. Die Zuordnung oder Adresse einer Ressource wird *Uniform Resource Identifier* (URI) genannt. Eine RDF-Beschreibung erfolgt üblicherweise nach folgendem Schema [141]:

RDF description = {[resource, property, property value]}.

Diese Beschreibung lässt sich im Sinne einer Ontologie auch als Subjekt (*resource*), Prädikat (*property*) und Objekt (*property value*) auffassen, wobei das Objekt wiederum eine Ressource sein kann [141]. Auf diese Weise lassen sich verschachtelte Daten ohne aufgezwungene Hierarchie abbilden. Das ist insbesondere dann wichtig, wenn sich Hierarchien ändern oder aber zum Zeitpunkt der Datensicherung noch nicht bekannt ist, welche Informationen zu einem späteren Zeitpunkt von Interesse sind. Eine vollständige Darstellung eines RDF erfolgt üblicherweise als gerichteter Graph.

Die Modellierung von Wissen entwickelt sich anhand der oben beschriebenen Ansätze insbesondere im Bereich des Technologiemanagements [142]. Aber auch im Bereich der Konstruktion, speziell bei der CAD-Modellbildung, existieren bereits erste Ansätze der Modellierung mittels RDF und entsprechenden Ontologien [143]. Neuere Arbeiten auf diesem Gebiet, bspw. von ZOCHOLL und ANDERL [144], nutzen Beschreibungen auf der Basis von Ontologien zur Beschreibung von Unsicherheiten in Produktdatenmodellen. Ein umfassendes Konzept zur Speicherung und Handhabung von Simulations- und Messdaten mittels RDF wird von ANDREJEV und RISCH [145] vorgestellt. ANDREJEV, HE und RISCH [146] stellen außerdem eine Implementierung des vorgestellten Konzeptes in Matlab vor, welches auch in Form einer früheren, einfacheren Umsetzung<sup>12</sup> im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet wird. Darin findet die Speicherung von Informationen über die Mess- und Simulationsdaten in einer SQL-Datenbank statt. Die Speicherung und Abfrage der Daten erfolgt mittels Matlab. Dabei werden die Mess- oder Simulationsdaten als mat-Dateien abgelegt. Parallel erfolgt ein Datenbank-Update, mit dem die

---

<sup>11</sup> Unter einer Ontologie versteht man die Gesamtheit von formalen Regeln, die zur strukturierten Beschreibung von Informationen und Relationen von Daten dient [138-140].

<sup>12</sup> Im Rahmen des *Scientific SPARQL project* stellt ANDREJEV [147] die Software *Scientific SPARQL Database Manager (SSDM)* für Matlab kostenfrei bereit. Diese erlaubt die Speicherung und Abfrage von Daten in einer SQL-Datenbank, wobei die Speicher- und Änderungsanweisungen sowie die Datenbankabfragen mit Matlab erfolgen.

---

Informationen über die Datensätze gespeichert werden. Als Sprache zur Formulierung von Speicher- und Änderungsaufträgen sowie für Abfragen wird die graphenbasierte Sprache *Scientific SPARQL* (SciSPARQL) [145] verwendet.

Eine Schwierigkeit ist die Definition zu verwendender Meta-Daten für die beschreibenden Eigenschaften. Werden Messungen oder Simulationen durchgeführt, liegt diesen Vorgängen in der Regel mindestens ein konkretes Ziel zugrunde, welches als quantifizierbare Ausprägung oder qualifizierbare Eigenschaft vorliegt. Diese Ausprägungen und Eigenschaften der jeweils verfolgten Ziele stellen folglich die Minimalanforderung an zu speichernde Meta-Daten dar. Im Fall einer Schalldruckmessung wäre also die Minimalanforderung die Information *Schalldruck* in den Meta-Daten sowie ggf. eine Information darüber, ob es sich um eine Summe, einen gemittelten Schalldruck oder um einen Spitzenwert handelt und evtl. auch spezifische Werte des jeweiligen Datensatzes. Zusätzliche Informationen können Randbedingungen, fachdisziplinspezifische Betrachtungsebenen oder Systemzustände sein. Möglich sind auch Werkstoffeigenschaften, Datum und Uhrzeit sowie weitere Informationen, wie bspw. der Bearbeiter. Auf eine erschöpfende Abhandlung möglicher Eigenschaften zur Repräsentation von Informationen aus Mess- und Simulationsdaten wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Vielmehr stehen zwei Problemstellungen im Vordergrund: die Zuordnung von akustischen Eigenschaften zu ihren Betriebsschwingformen sowie das Zugänglichmachen von daraus abgeleiteten Regeln.

Um die Modellierung der zugrunde gelegten Daten so einfach wie möglich zu halten, wird im Rahmen dieser Arbeit jeder erzeugte Datensatz als eine einzelne Ressource aufgefasst. Das bedeutet, dass jeweils ein Schnellefeld (Ergebnis einer numerischen oder experimentellen Simulation) eine Ressource ist. Jede Ressource wird mit einer eindeutigen *ID* identifiziert. Bei den angedeuteten Eigenschaften *Eigenschaft1* bis *Eigenschaftn* handelt es sich um die Größen, die im Rahmen dieser Arbeit als Datenbasis durch numerische Simulationen gewonnen wurden. In Pseudocode ergibt sich folgendes RDF-Schema in XML-Notation als Abbildung der erzeugten Datenbasis.

```
<rdf:RDF>
  <rdf:Description rdf:about="Speicherort/ID">
    <rdfs:label>Datensatzname</rdfs:label>
    <dc:Eigenschaft1>Wert1</dc:Eigenschaft1>
    <dc:Eigenschaft2>Wert2</dc:Eigenschaft2>
    ...
    <dc:Eigenschaftn>Wertn</dc:Eigenschaftn>
  </rdf:Description>
</rdf:RDF>
```

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Eigenschaften sind in der folgenden Tabelle 3-1 aufgelistet. Der Datensatz, der eindeutig mittels *ID* identifiziert wird, besteht aus dem Vektor des Schnellefeldes. Die Beschreibung des Datensatzes kann einerseits um zusätzliche Eigenschaften in Form von Werten erweitert werden, es ist aber auch möglich, anstelle

einfacher Eigenschaften weitere Objekte über Eigenschaftsattribute zu verknüpfen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stellt insbesondere die Klassifizierung einer Schwingform in eine Klasse eine wichtige Erweiterung dar.

Tabelle 3-1: Eigenschaften eines Datensatzes der erzeugten Datenbasis

| Eigenschaft                                | Einheit                 |
|--|-------------------------|
| Nummer des fixierten Knotens               | dimensionslos           |
| Nummer der Eigenmode                       | dimensionslos           |
| Frequenz                                   | Hz                      |
| Eingangsleistung                           | W                       |
| abgestrahlte Schallleistung (Realteil)     | W                       |
| abgestrahlte Schallleistung (Imaginärteil) | W                       |
| mittlere quadratische Oberflächen-schnelle | $\text{m}^2/\text{s}^2$ |
| Abstrahlgrad                               | dimensionslos           |

Für eine zukünftige, komplexere und allgemeinere Beschreibung einer Datenbasis können auf diese Weise auch einzelne Lösungsschritte eines komplexen Simulationsmodells aufgelöst werden, sodass man eine Schwingform einem bestimmten Simulationsmodell zuordnen kann. Dieser Sachverhalt ist nachfolgend in Abbildung 3-5 veranschaulicht.

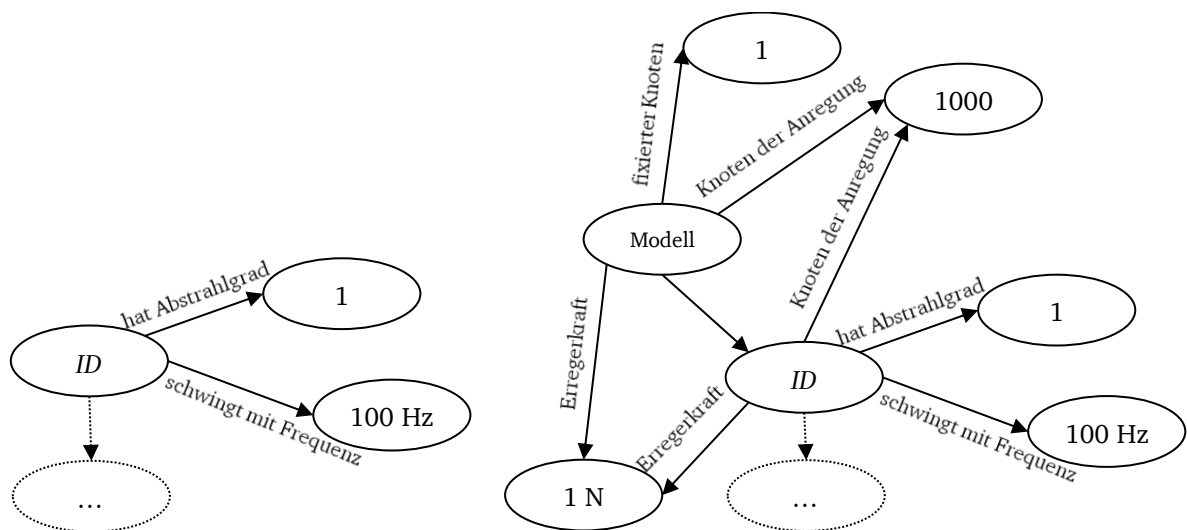


Abbildung 3-5: Visualisierung der implementierten RDF-Beschreibung (links) und Erweiterung (rechts) einer erzeugten Schwingform *ID*

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erscheint eine derartige Handhabung aufgrund des geringen Umfangs von nur 390 Samples (Vorgriff auf Kapitel 4) mit einem beherrschbaren Beschreibungsumfang zunächst unverhältnismäßig. Legt man jedoch die Phasen des in Abschnitt 3.1 skizzierten Data-Mining-Prozesses zugrunde, wird deutlich, dass eine Implementierung der Daten in der vorgestellten Art und Weise gewisse Vorteile hat. So können einerseits die Voruntersuchungen und Prüfung der Daten auf Korrelationen effizienter durchgeführt werden und andererseits sind die Klassifikation der Datensätze sowie das Hinzufügen weiterer Eigenschaften



---

zu den Datensätzen, wie z. B. eine Klassenzuordnung, ohne größere Umstrukturierungen möglich, wie es bspw. bei der Modellierung der Daten mit Hilfe von Strukturvariablen der Fall wäre. Auch eine Unterscheidung zwischen Simulationsergebnissen und Messergebnissen ist so problemlos möglich. Weiterhin lassen sich auf diese Weise aus im Rahmen des Data-Mining-Prozesses abgeleitete Maßnahmen und Regeln Handlungsanweisungen formulieren.

Auf die Implementierung der erzeugten Datenbasis im Rahmen dieser Arbeit wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

---

### 3.3 Analysemethoden des Data-Mining

---

Mit der Bezeichnung Data-Mining werden sämtliche (statistischen) Methoden zusammengefasst, die der Erkennung von Mustern und dem Ableiten von Regeln aus vorliegenden Daten dienen. Wie bereits beschrieben, erfolgt das Data-Mining in der Regel als Prozess. Die eigentliche Datenanalyse (Simulation) ist ein Schritt eines solchen Prozesses. Die Bandbreite reicht dabei von der Ableitung einfacher Polynome bis hin zu komplexen künstlichen neuronalen Netzen (KNN) oder Verfahren der genetischen Programmierung. Welche Verfahren verwendet werden, hängt vom Einsatz ab. So können einfach Regeln mit Hilfe von einfachen Polynomen oder Regressionsansätzen abgeleitet werden, im Fall komplexer Funktionenapproximationen oder bei teilweise vorhandenem Wissen über vorliegende Strukturen sind Verfahren der genetischen Programmierung besser geeignet [148]. In all diesen Fällen werden Funktionswerte einer zu bestimmenden Funktion  $y$  in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Eingangsvariablen, die in der Regel als Eingabevektoren  $\mathbf{x}^i$  eines ( $i$ -ten) Datensatzes vorliegen, berechnet. Die identifizierte Funktion  $f$  bildet in diesem Fall das jeweilige Muster ab.

$$y = f(\mathbf{x}^i) = f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) \quad (3-1)$$

In der Literatur gibt es umfangreiche Abhandlungen über die Ableitung und Verwendung von Approximationen und anderen mathematischen Modellen im technischen Anwendungsumfeld, die häufig auch Ersatzmodelle oder Metamodelle genannt werden.<sup>13</sup> Sollen oder können Muster und Regeln nicht in Form von Berechnungsvorschriften oder Kennfeldern identifiziert werden, können anstelle von Approximationsverfahren Klassifikationsverfahren zum Einsatz kommen.

---

<sup>13</sup> Das Schrifttum in diesem Bereich umfasst eine große Anzahl passender Veröffentlichungen, weshalb nachfolgend lediglich zwei Beispiele als exemplarischer Einstieg in die Literatur gegeben werden. In der Arbeit von SIMPSON et al. [149] findet sich eine knappe, zusammenfassende Abhandlung über Eigenschaften von Modellierungsmethoden mit Entscheidungshilfen, in welchen Anwendungsfällen welche Modelle verwendet werden sollen. Eine umfassendere Einführung wird von GÜNTHER und VELTEN [150] gegeben. Als Einstieg in die mathematische Modellbildung, speziell unter Berücksichtigung der statistischen Versuchsplanung, sei außerdem das Standardwerk von MONTGOMERY [151] erwähnt.



---

Den Klassifikationsverfahren kommt im Bereich des Data-Mining eine gewichtige, wenn nicht sogar die wichtigste Rolle zu. Im Rahmen dieser Arbeit stellen sie, wie später dargestellt, die Grundlage für die Bewertung von Schwingformen dar. Deshalb werden die Grundlagen einführend erläutert. Die im Nachfolgenden verwendeten Begriffe beziehen sich dabei auf Definitionen aus [152, 153]. Darin werden Merkmalstupel  $(x_1, \dots, x_n)$  aus Variablen als Objekte  $O$  bezeichnet. Eine Teilmenge von als zusammengehörig angesehenen Objekten wird als Klasse  $K$  bezeichnet. Klassifizierung oder Klassifikation bezeichnet die Zuordnung eines Objektes zu einer Klasse mit Hilfe eines Klassifikators  $C$ .

$$C: O \rightarrow K \quad (3-2)$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die zu klassifizierenden Objekte  $O$  als Eingabevektoren  $\mathbf{x}^i$  bezeichnet. Die Gesamtheit aller vorliegenden Klassen  $K^{(j)}$  wird aus praktischen Gründen auch in vektorieller Form  $\mathbf{K} = (K^{(1)}, \dots, K^{(j)}, \dots, K^{(N)})$  angegeben.

Eine Klassifikation kann prinzipiell auf unterschiedliche Arten erfolgen. Man unterscheidet u. a. zwischen manuellen oder automatischen Verfahren sowie zwischen überwachten und unüberwachten Verfahren. Bei der unüberwachten Klassifizierung erfolgt die Klassifizierung ausschließlich auf der Basis der zur Verfügung stehenden Merkmale. Es gibt keine vorher definierten Klassen. Diese Art des Klassifizierens wird oftmals auch als *Clustering* oder *Clusteranalyse* bezeichnet. Wird auf vorher definierte Klassen zurückgegriffen, handelt es sich um überwachtes Klassifizieren. Beim manuellen Klassifizieren erfolgt die Klassifikation durch manuelle Eingaben oder manuelle Definition. Die automatische Klassifikation erfolgt automatisiert mittels geeigneter Algorithmen.

Die Klassifikation bietet beim Data-Mining den Vorteil, dass sich sowohl Klassen durch Objekte mit bestimmten Eigenschaften definieren lassen als auch Klassen ohne vorherige Definition von zugehörigen Objekten algorithmisch mit Objekten besetzt werden können.

---

### 3.4 Klassifikation vorliegender akustischer Systeme

---

In Abschnitt 3.3 wurde die Klassifikation als ein wichtiges Werkzeug (Analysemethode) des Data-Mining eingeführt. Die Eigenschaften, nach denen die zu klassifizierenden Objekte  $O$  den Klassen  $K^{(j)}$  zugeordnet werden, liegen in der Regel als Eingabevektoren  $\mathbf{x}^i$  vor. Dabei kann man entweder die Gesamtheit aller vorliegenden Daten eines Objektes als Eingabevektor zusammenfassen oder nur bestimmte Eigenschaften.

Sofern eine völlig unbekannte Datenbasis verwendet wird und in Phase 3 (*Datenaufbereitung*) des in Abschnitt 3.1 skizzierten Data-Mining-Prozesses keine Korrelationen identifiziert werden, sollte die Gesamtheit aller Informationen als Eingabevektor verwendet werden und die Klassifikation den jeweils verwendeten Algorithmen überlassen werden. Diese Herangehensweise wird dadurch gestützt, dass das Fehlen von Informationen über mögliche Eigenschaften das

---

Identifizieren von *relevanten* und *nicht relevanten* Informationen unmöglich macht. Auch bei einer ausschließlichen Interpretation der abzuleitenden Regeln (Phasen 5 und 6) durch Maschinen (Computer) ist eine Vorauswahl zu verarbeitender Daten nur dann sinnvoll, wenn dies zu einer erheblichen Reduktion des Rechenaufwandes führen würde.

Liegen Informationen über kausale Zusammenhänge von einzelnen Daten vor, so ist es sinnvoll, diese zu verwenden und nur Teile des Datensatzes als Eingabevektoren zu verwenden. Sind Eigenschaften bekannt, die im Sinne der Zielstellung (Phase 1) von Interesse sind und aus denen Klassen gebildet werden können, so ist es ebenfalls von Vorteil, diese Eigenschaften zur Klassenbildung zu verwenden. Dabei kommt es nicht darauf an, ob die Klassen nach diesen Eigenschaften erstellt oder nur nach ihnen ausgewertet werden. Der Unterschied zwischen beiden Möglichkeiten liegt darin, dass im ersten Falle die Klassen durch die Ausprägung der Eigenschaft repräsentiert werden und im zweiten Fall die Ausprägung anderer Eigenschaften.

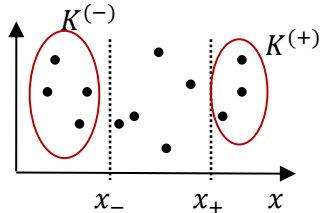
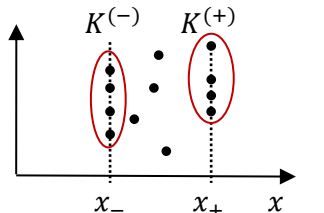
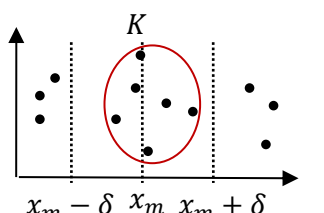
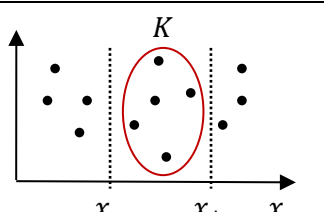
In praktisch jedem Anwendungsfall kann auf unterschiedliche Weise klassifiziert werden. Das gilt auch dann, wenn es sich bei den zugrunde gelegten Daten um Messdaten oder Simulationsergebnisse akustischer Systeme handelt. So könnten Klassen nach der Art des technischen Erzeugnisses (Getriebe, Fahrzeug, Linearmotor, Hydropumpe etc.) gebildet werden. Weitere Möglichkeiten sind die Klassifikation nach Systemzuständen, der Geometrie oder anderen Eigenschaften. Auch eine Klassifikation nach Art der Daten, wie z. B. Messdaten oder Simulationsergebnisse kann sinnvoll sein. Im Fall von Simulationsdaten ist eine Klassifikation der jeweiligen Analyseverfahren oder Lösungseigenschaften denkbar. Außerdem ist eine Klassifizierung auf Basis von technischen Anforderungen sowie normativen oder rechtlichen Vorgaben möglich.

Spezielle akustische Eigenschaften für die Bildung oder Auswertung von Klassen sind Größen, wie die Frequenz, Impedanzen, Schalldrücke, Schallschnellen oder der Abstrahlgrad im Sinne der maschinenakustischen Grundgleichung (siehe Gleichung (2-1)). Auch Art und Ort der Anregung sowie die strukturdynamisch relevanten Randbedingungen können zur Klassenbildung oder Klassenauswertung verwendet werden. Möglich ist auch eine Verwendung modaler Größen, wie Eigenwerte (Eigenfrequenzen) und Eigenvektoren (Eigenmoden) oder modale Steifigkeiten, modale Massen und modale Dämpfungen. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Art und Weise der Klassifikation der Schwingformen wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

Außer der Art und Weise der Klassifikation liegt eine weitere Herausforderung in der Klassendefinition. So liegen in vielen Fällen die Klassen nicht in Form von diskreten Eigenschaften vor, sondern stellen vielmehr Wertebereiche dar. Dies ist auch aufgrund von Unsicherheiten bei der Identifikation dieser Größe sinnvoll, wie z. B. Messfehler oder vernachlässigte Effekte bei der Modellbildung.

In Bezug auf die abgestrahlte Schallleistung technischer Erzeugnisse bietet sich prinzipiell eine Definition von Klassen mit Werten über oder unterhalb eines Schwellwertes, Klassen mit konkreten Werten, Klassen mit einem Mittelwert und einer Streuung sowie in Form von Klassen als Band mit einer Ober- und einer Untergrenze an. Gleiches gilt auch für Größen wie den Abstrahlgrad, die Schallschnelle oder den Schalldruck. Diese Möglichkeiten sind in der Übersicht in Tabelle 3-2 verdeutlicht. Eine umfangreiche Auseinandersetzung mit der Klassendefinition findet sich außerdem in der Habilitationsschrift von WALTER [154].

Tabelle 3-2: Möglichkeiten der Definition von Klassen

|  |   |   |
|--|---|---|
| Klassendefinition über Schwellwerte            | $K^{(+)} = \{x \mid x > x_{+}\}$ $K^{(-)} = \{x \mid x < x_{-}\}$ |    |
| Klassendefinition über definierte Werte        | $K^{(+)} = \{x \mid x = x_{+}\}$ $K^{(-)} = \{x \mid x = x_{-}\}$ |   |
| Klassendefinition über Mittelwert und Streuung | $K = \{x \mid x = x_m \pm \delta\}$                               |  |
| Klassendefinition über Ober- und Untergrenze   | $K = \{x \mid x_{-} \leq x \leq x_{+}\}$                          |  |

In den späteren Abschnitten erfolgt die Klassendefinition auf zwei Weisen: anhand der Verwendung von Schwellwerten und anhand der Verwendung von Ober- und Untergrenzen.

### 3.4.1 Verfahren zur Klassifikation von Schwingformen

In der Literatur finden sich viele Klassifikationsverfahren. Davon sind die meisten prinzipiell für die Klassifikation akustischer Systeme, wie sie in dieser Arbeit geschieht, geeignet. Eine vollumfängliche Übersicht würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch übersteigen. Eine gute Übersicht verschiedener Verfahren sowie eine Auflistung von deren Vor- und Nachteilen bieten HAN und KAUFMANN [155]. Auch die Habilitationsschrift von WALTER [154] enthält eine

---

umfangreiche Darstellung möglicher Verfahren. Dennoch sollen nachfolgend einige grundlegende Informationen über geeignete Verfahren genannt werden. Anschließend erfolgt die Begründung für die Auswahl der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Klassifikationsverfahren.

Wie bereits in Abschnitt 3.4 erläutert, wird u. a. zwischen überwachter und unüberwachter Klassifikation unterschieden. Bei der überwachten Klassifikation werden Klassen durch Vorgabe bestimmter Eigenschaften definiert. Das bedeutet, dass man Eigenschaften, also Ausprägungen bestimmter Merkmale von Objekten, in bestimmte Wertebereiche unterteilt und diese Bereiche als Klassen nutzt. Die prinzipiellen Möglichkeiten der Klassendefinition sind bereits in Tabelle 3-2 skizziert. Die Klassendefinition kann entweder durch Definition ohne vorhandene Datensätze geschehen oder aber anhand von Referenzdatensätzen, die als Trainingsdaten verwendet werden. Beim Data-Mining kann diese Form der Klassifikation dazu genutzt werden, um Datensätze bestimmter Eigenschaften zu gruppieren und dann weitere Eigenschaften auf gemeinsame Ausprägungen und Muster hin zu untersuchen.

Bezogen auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit kommt bei der überwachten Klassifikation folgendes Vorgehen infrage. Die untersuchten Schwingformen liegen mit sämtlichen Eigenschaften über ihre Schallabstrahlung vor. Die Eigenschaften dienen dann als Merkmale zur Klassenbildung. Man wählt folglich Schwingformen mit bestimmten Eigenschaften als Referenz zur Klassenbildung. In diesem Fall dienen die Eigenschaften der Schwingformen als Muster, welche algorithmisch wiedererkannt werden können.

Bei der unüberwachten Klassifikation erfolgt die Klassendefinition automatisch. Lediglich die Anzahl der zu verwendenden Klassen wird vorgegeben. Die Eigenschaften zur Definition der Klassen werden algorithmisch festgelegt.

Die vermutlich einfachste Form eines Klassifikationsverfahrens stellen Entscheidungsbäume dar. Im einfachsten Fall wird eine Eigenschaft eines Objektes überprüft und die Klassifikation anhand einer Ja-Nein-Entscheidung durchgeführt [156].

Den Entscheidungsbäumen ähnlich ist die Klassifikation mit Assoziationsregeln. Dabei werden Objekte den Klassen mit Hilfe der Mengenlehre und logischer Verknüpfungen zugeordnet. Liegen die Ausprägungen der Eigenschaften von Objekten auf eine Weise vor, sodass sich die Wertebereiche der Eigenschaften in Intervalle einteilen lassen, kann die Klassifikation auch durch die Lage im Wertebereich erfolgen. In einem solchen Fall spricht man von Klassifikation mit einem Quader-Klassifikator [153].

Auch die Fuzzy-Logik ermöglicht die Klassifikation von Objekten. Dabei besitzt jedes Objekt eine Zugehörigkeitsfunktion, welche Werte im Intervall  $[0,1]$  annehmen kann. Die Zugehörigkeitsfunktion nimmt für die Klasse, zu der ein Objekt mit der höchsten Wahrscheinlichkeit gehört, einen maximalen Wert an. Außerdem erlaubt die Zugehörigkeitsfunktion Aussagen über

---

die Qualität einer Klassenzuordnung. Dieses Fuzzy-Pattern-Klassifikation genannte Verfahren ist für unscharfe Klassen besonders geeignet [157].

Eine weitere Möglichkeit zur Klassifikation von Objekten ist die Anwendung von Stützvektormaschinen (engl. *Support Vector Machines* oder kurz *SVM*). Dabei handelt es sich um eine Schar möglicher Verfahren, die auf vielfältige Art und Weise mathematisch umgesetzt werden können. SVM gelten als mächtig und erlauben neben der Klassifikation auch das Ableiten von Regeln [156].

Die bisher genannten Klassifikationsverfahren sind insbesondere für die überwachte Klassifikation geeignet. Zwar können mittels spezieller Verfahren auch unüberwachte Klassifikationen durchgeführt werden, dafür ist jedoch ein teilweise erheblicher Aufwand nötig. Insbesondere im Fall der SVM wird dieser Aufwand jedoch zunehmend in Kauf genommen, da die Verfahrensklasse einige Vorteile aufweist, welche die Nachteile des höheren Aufwandes überwiegen.

Sehr mächtig und in der Umsetzung auf vielfältige Weise realisierbar sind künstliche neuronale Netze (KNN), die im nächsten Abschnitt genauer beschrieben werden. Sie erlauben sowohl den Einsatz bei der überwachten als auch bei der unüberwachten Klassifikation und sind auch hinsichtlich der Anzahl der zu berücksichtigenden Merkmale und in Bezug auf die Anzahl möglicher Klassen nahezu unbeschränkt.

Im Gegensatz zu den komplexen Verfahren gibt es außerdem noch den *k*-Means-Algorithmus, speziell für die unüberwachte Klassifikation. Er wird von HAN und KAMBER [158] als Referenzverfahren mit guten Ergebnissen angeführt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden für die unüberwachte Klassifikation KNN sowie der *k*-Means-Algorithmus verwendet. Als Klassifikatoren für die überwachte Klassifikation kommen ausschließlich KNN zum Einsatz.

Die Entscheidung für die Anwendung der beiden Verfahren erfolgt aus mehreren Gründen. Für die unüberwachte Klassifikation gilt, wie bereits genannt, der *k*-Means-Algorithmus zwar als einfaches Verfahren, wird aber aufgrund seiner guten Klassifikationsergebnisse gerne als Referenz verwendet. Ein weiterer Vorteil des *k*-Means-Algorithmus ist seine schnelle Arbeitsweise. Da lediglich Vektoren, welche die Schwerpunkte einer Klasse beschreiben, bestimmt werden müssen und das Verfahren zum Konvergieren gezwungen wird, ist der numerische Aufwand im Vergleich zu KNN oder SVM erheblich geringer.

KNN sind sowohl für die überwachte als auch für die unüberwachte Klassifikation ausführbar. So kann ein KNN zunächst für die unüberwachte Klassifikation trainiert werden und später ohne weiteres Training als Klassifikator für die überwachte Klassifikation eingesetzt werden, sofern die zuvor identifizierten Klassen verwendet werden. Das ist, insbesondere auch im

Hinblick auf einen praktischen Einsatz, ein erheblicher Vorteil. Diesem Vorteil steht ein ggf. erheblicher Aufwand für das Training eines KNN gegenüber.

Für die Wahl der KNN sprechen im Kontext der vorliegenden Arbeit jedoch noch weitere Aspekte. So können bestimmte Arten von KNN beim unüberwachten Klassifizieren so angelegt werden, dass bei der mathematischen Definition des KNN eine Abstraktion der Geometrie des Problemgebietes (Schnellefeld einer ebenen Rechteckplatte) erfolgt. Die Gewichtsvektoren (siehe Anhang) eines solchen KNN erlauben für jede Klasse die Interpretation der geometrischen Eigenschaften der zur jeweiligen Klasse gehörenden Schnellefelder. Die beiden eingesetzten Verfahren werden in den folgenden beiden Abschnitten erläutert.

### 3.4.2 Klassifikation mit künstlichen neuronalen Netzen

Das Nervensystem von Lebewesen kann abstrakt als neuronales Netz beschrieben werden. Dabei werden Informationen biochemisch über die Synapsen von Neuron zu Neuron transportiert. Ein KNN bedient sich dieses natürlichen Vorbildes. Es besteht aus miteinander verknüpften künstlichen Neuronen [159]. Der prinzipielle Aufbau eines solchen künstlichen Neurons ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

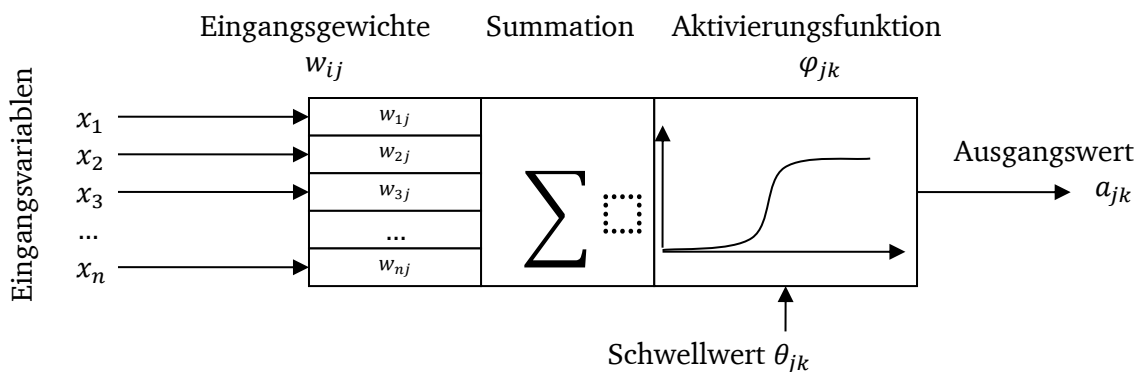


Abbildung 3-6: Aufbau eines künstlichen Neurons in Anlehnung an [160]

Das einfache künstliche Neuron hat eine zu definierende Anzahl  $n$  an Eingangsvariablen  $x_i$ , die auch Faktoren genannt oder in ihrer Gesamtheit als Eingabemuster oder Eingabevektor bezeichnet werden. Die an den Eingängen anliegenden Eingangswerte der Eingangsvariablen  $x_i$  werden mit Eingangsgewichten  $w_{ij}$  gewichtet und anschließend aufsummiert [159].<sup>14</sup> Diese Summe, die auch Integrationsfunktion oder Propagierungsfunktion [161]

$$g_{jk} = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i \quad (3-3)$$

<sup>14</sup> Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass anstelle der Eingangsvariablen  $x_i$  auch Eingangsvariablen  $\mathbf{x}_i$  in vektorieller Form (z. B. Zeitreihen, Spektren etc.) verwendet werden können. In diesem Fall kann sich die Komplexität der Beschreibung dahingehend erhöhen, dass auch die Eingangsgewichte  $w_{ij}$  in vektorieller Form ( $\mathbf{w}_{ij}$ ) angegeben werden müssen.

genannt wird, wird anschließend als Variable für die Aktivierungsfunktion  $\varphi_{jk}$  verwendet. Übersteigt die Integrationsfunktion  $g_{jk}$  einen Schwellwert  $\theta_{jk}$ , nimmt die (häufig sigmoidale) Aktivierungsfunktion  $\varphi_{jk}$  einen ausreichend großen Wert an und das künstliche Neuron *feuert*. In diesem Fall liegt am Ausgang ein von 0 verschiedener Ausgangswert  $a_{jk}$  (bei Klassifikationsaufgaben i. d. R. von 1) an. Er dient, je nach Position im KNN, entweder als Eingang für ein weiteres künstliches Neuron oder als Ausgangswert der jeweiligen Anwendung.<sup>15</sup> Ist die Summe der gewichteten Eingangssignale deutlich kleiner als der Schwellwert  $\theta_{jk}$ , *feuert* das künstliche Neuron nicht und der Wert am Ausgang erhält den Wert 0. Der Schwellwert  $\theta_{jk}$  kann auch als Bias aufgefasst werden. Für ein einfaches künstliches Neuron ergibt sich der Ausgangswert  $a_{jk}$

$$a_{jk} = \varphi_{jk}(g_{jk} - \theta_{jk}). \quad (3-4)$$

Verknüpft man mehrere künstliche Neuronen miteinander, spricht man, wie bereits erwähnt, von einem KNN. Der Aufbau des KNN kann auf unterschiedliche Weise erfolgen und wird durch seine Topologie charakterisiert. Die Netzwerktopologie beschreibt, aus wie vielen künstlichen Neuronen das KNN besteht und wie diese miteinander verbunden sind. Auf der Seite der Eingänge wird das KNN durch die Eingangsschicht charakterisiert. Diese besteht aus künstlichen Neuronen, denen in der Regel jeweils alle Eingangsvariablen zur Verfügung stehen. Handelt es sich lediglich um ein einschichtiges Netz, ist dieses gleichzeitig die Ausgabeschicht. Handelt es sich um ein mehrschichtiges Netz, gibt es weitere Schichten. Der Ausgang wird dann durch die Ausgabeschicht beschrieben und es existieren die verborgenen Schichten (meist englisch: *hidden layers*), deren Ausgänge nach außen nicht sichtbar sind.

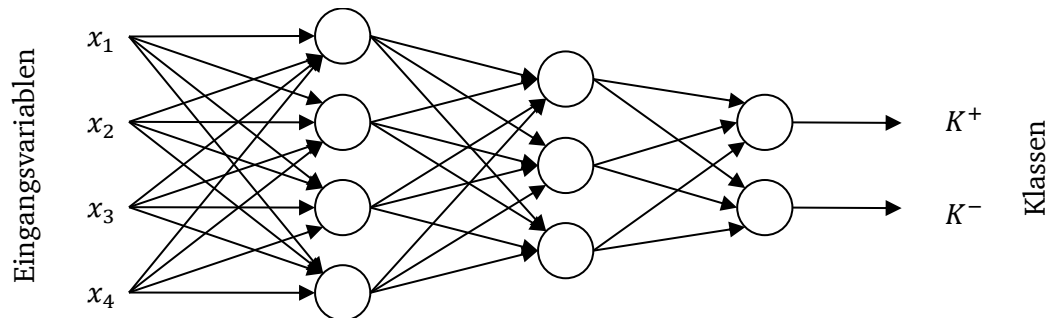


Abbildung 3-7: Dreischichtiges KNN mit vier Eingangsvariablen und zwei Klassen repräsentierenden Ausgängen

<sup>15</sup> Streng genommen muss die Aktivierungsfunktion  $\varphi_{jk}$  keinen sigmoidalen Charakter aufweisen, wie oben beschrieben, und auch der Wert der Aktivierungsfunktion kann von 0 und 1 verschiedene Werte annehmen. Beispielsweise werden beliebige Aktivierungsfunktionen beim Einsatz von KNN zur Regression oder zur Abbildung von Kennfeldern verwendet. In diesen Fällen *feuert* ein künstliches Neuron nicht im eigentlichen Sinn, sondern gibt kontinuierliche (positive und negative) Ausgangssignale aus. So kann bspw. durch die Kombination einer Schicht mit sigmoidalen Aktivierungsfunktionen und einer weiteren Schicht mit linearen Aktivierungsfunktionen nahezu jeder beliebige Verlauf einer endlich-dimensionalen Funktion nachgebildet werden. Für weiterführende Informationen sei auf die einschlägige Literatur verwiesen, wie bspw. HOFFMANN [162] und KRIESEL [161].



Die Ausgänge der Ausgabeschicht selbst stellen bei Klassifizierungsaufgaben, wie in der vorliegenden Arbeit, die jeweiligen Klassen dar. Der prinzipielle Aufbau eines dreischichtigen KNN mit vier Eingangsvariablen und zwei Klassen ( $K^+$  und  $K^-$ ) als Ausgängen ist in Abbildung 3-7 dargestellt.

Beschreibt man ein einschichtiges KNN mit  $n$  Eingängen und  $m$  Ausgängen, ergibt sich der Vektor der Ausgänge  $\mathbf{a}$  direkt aus dem Vektor der Aktivierungsfunktionen  $\boldsymbol{\varphi}$ , der wiederum vom Vektor der Integrationsfunktionen  $\mathbf{g}$  sowie dem Vektor der Schwellwerte  $\boldsymbol{\theta}$  abhängt. Man erhält analog zu Gleichung (3-4)

$$\mathbf{a} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{g} - \boldsymbol{\theta}). \quad (3-5)$$

Unter Verwendung von Gleichung (3-3) ergibt sich für den Ausgangsvektor  $\mathbf{a}$  eines einschichtigen KNN

$$\mathbf{a} = \boldsymbol{\varphi}\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{w}_{ij} \mathbf{x}_i - \boldsymbol{\theta}\right). \quad (3-6)$$

Für ein zweischichtiges KNN folgt dann ein Ausgangsvektor  $\mathbf{a}_2$

$$\mathbf{a}_2 = \boldsymbol{\varphi}_2(\mathbf{g}_2 - \boldsymbol{\theta}_2) = \boldsymbol{\varphi}_2\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{w}_{i2} \boldsymbol{\varphi}_1\left(\sum_{i=1}^n \mathbf{w}_{i1} \mathbf{x}_i - \boldsymbol{\theta}_1\right) - \boldsymbol{\theta}_2\right) \quad (3-7)$$

und für ein mehrschichtiges Netz wird die Entwicklung des Gleichungssystems in entsprechend geschachtelter Form beliebig fortgesetzt.

Die bereits unkommentiert eingeführten Indizes  $j$  und  $k$  kennzeichnen die Position des künstlichen Neurons innerhalb der zugrunde gelegten Netztopologie. Die Anzahl der Neuronen in einer Schicht  $U_k$  entspricht dabei in der Regel dem Index  $j$  und die Anzahl der Netzschichten dem Index  $k$ . In den meisten Fällen entspricht die Anzahl der Neuronen der Eingangsschicht  $j$  der Anzahl  $n$  der Eingänge.

Derartige KNN können sowohl zur überwachten als auch zur unüberwachten Klassifikation verwendet werden. Handelt es sich um eine Aufgabe der überwachten Klassifikation, werden vorliegende Trainingsdaten genutzt, um das KNN so zu trainieren, dass spätere Datensätze erkannt und einer vorher definierten Klasse zugeordnet werden. Handelt es sich um eine Problemstellung der unüberwachten Klassifikation, wird das KNN so trainiert, dass es ähnliche Datensätze erkennt und einer zuvor nicht definierten Klasse oder einer selbst generierten Klasse zuordnet. Bei den unterschiedlichen Aufgabenstellungen unterscheiden sich nicht nur die Trainingsalgorithmen, sondern auch die Topologien der KNN. Im Folgenden werden die beiden unterschiedlichen Herangehensweisen beim überwachten und beim unüberwachten Klassifizieren mit Hilfe von KNN kurz erläutert.



Beim Clustering, also der unüberwachten Klassifikation, mit KNN kommen selbstorganisierende Karten, im Englischen *self-organizing maps*<sup>16</sup> (nachfolgend kurz SOM) zum Einsatz. Dabei handelt es sich um KNN, die aus einer Eingabeschicht  $U_I$  und einer Ausgabeschicht  $U_0$ , die im Falle der SOM Wettbewerbsschicht genannt wird, bestehen. Die Anzahl der künstlichen Neuronen der Eingabeschicht entspricht in der Regel der Anzahl  $n$  der Eingangsvariablen. Jedes künstliche Neuron der Eingabeschicht ist mit allen Neuronen der Wettbewerbsschicht mit Gewichten verbunden, die im Gewichtsvektor

$$\omega_j = (\omega_{(1,j)}, \omega_{(2,j)}, \dots, \omega_{(n,j)}) \quad (3-8)$$

zusammengefasst werden. Dabei kennzeichnet der Index  $j$  das  $j$ -te Neuron der Wettbewerbsschicht. In der Regel besitzen die Neuronen einer SOM keine Aktivierungsfunktion, weshalb die Ausgabe der Neuronen nur von den Gewichten abhängt. Dafür ist jedes Ausgabeneuron mit allen anderen Neuronen der Wettbewerbsschicht verbunden. Die Gewichte zwischen Eingabe- und Wettbewerbsneuronen bestimmen zusammen mit der Topologie die Architektur der SOM.

Als Topologie bezeichnet man die geometrische Anordnung der Neuronen der Wettbewerbsschicht. Jede Position eines Neurons wird durch einen Koordinatenvektor  $\mathbf{h}_k$  angegeben. Der Koordinatenvektor hat die Dimension des zugrunde gelegten Neuronen-Gitters der Wettbewerbsschicht. Die Wettbewerbsschicht kann theoretisch beliebige Dimensionen annehmen, meist werden jedoch 2- und 3-dimensionale Neuronen-Gitter verwendet [160]. Jeder Ausgang eines Neurons der Wettbewerbsschicht entspricht einer Klasse  $K^c$ . Abbildung 3-8 zeigt eine SOM mit einer 2-dimensionalen, rechteckigen Ausgabeschicht.

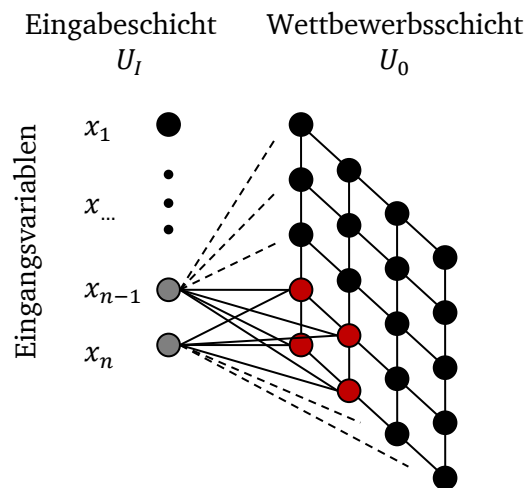


Abbildung 3-8: Veranschaulichung einer selbstorganisierenden Karte am Beispiel eines zweidimensionalen Neuronen-Gitters als Wettbewerbsschicht

<sup>16</sup> In der Literatur werden SOM auch Kohonen-Karten, Kohonen-Netze oder Kohonen-Merkmalsskarte genannt. Im Englischen wird außerdem die Bezeichnung *self-organizing feature map* verwendet [159, 163, 164].

Die Verbindungslinien zwischen den Neuronen der Eingabeschicht  $U_I$  und der Wettbewerbsschicht  $U_0$  stellen die Gewichte  $\omega_{(n,j)}$  der Gewichtsvektoren  $\omega_j$  dar. Eine grafische Darstellung des Koordinatensystems einer 2-dimensionalen, rechteckigen SOM findet sich in Abbildung 3-9. Die Einträge des Koordinatenvektors  $\mathbf{h}_k$  des rot hervorgehobenen Neurons lauten im zugrunde gelegten Koordinatensystem  $\mathbf{h}_k = (3,2)$ . Jedem Neuron der Wettbewerbsschicht wird dabei eine eindeutige Position zugeordnet, die aber keine physikalische Bedeutung hat. Sie ist vielmehr Mittel zum Zweck, um die SOM anlegen und trainieren zu können.

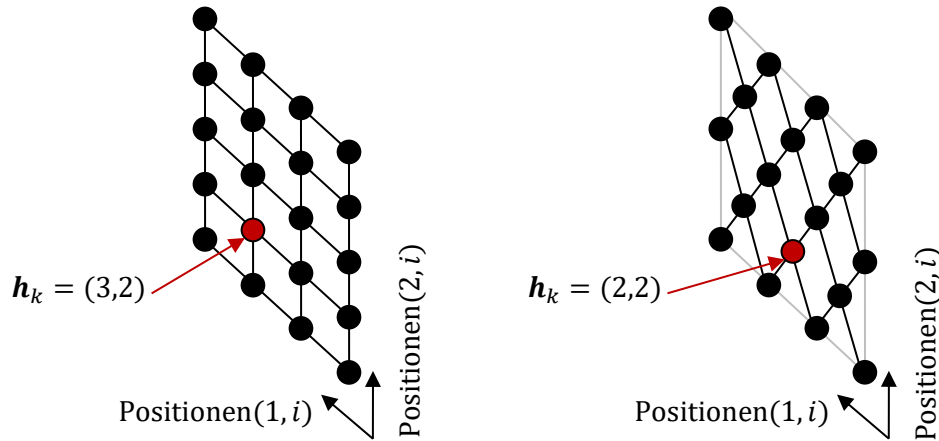


Abbildung 3-9: Mögliche Topologien zweidimensionaler, rechteckiger SOM

Der Einsatz der SOM als Werkzeug zur unüberwachten Klassifikation erfordert eine bestimmte Art des Trainings. Der Trainings-Algorithmus wird erstmals von KOHONEN [165] beschrieben.

Zunächst werden in einem Initialisierungsschritt die Gewichtsvektoren  $\omega_j$  mit Zufallszahlen gefüllt. Anschließend wird ein erstes Objekt  $O$  als Eingabevektor  $\mathbf{x}^1 = (x_1, \dots, x_n)^1$  an die Eingabeschicht  $U_I$  angelegt. Nun wird das erste Gewinner-Neuron  $q_0$  bestimmt. Das Gewinner-Neuron  $q_0$  ist genau das Neuron der Wettbewerbsschicht  $U_0$ , dessen Gewichtsvektor  $\omega_j$  dem Eingabevektor am ähnlichsten ist. Für die Beurteilung der Ähnlichkeit stehen prinzipiell unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Am verbreitetsten ist die Verwendung der Euklidischen Norm [163, 166], die auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Folglich ergibt sich ein Gewinner-Neuron  $q_\tau$  aus der Beziehung

$$q_\tau(\mathbf{x}^i) = \arg \min_j \|\mathbf{x}^i - \omega_j\|. \quad (3-9)$$

Der Index  $\tau$  kennzeichnet den Trainingsschritt, der im Kontext der KNN in der Regel *Epoche* genannt wird. Theoretisch können die Euklidischen Distanzen mehrerer Gewichtsvektoren zum Eingabevektor gleich sein. In diesem Fall können unterschiedliche Auswahlstrategien angewandt werden. In der vorliegenden Arbeit wird in einem solchen Fall der Eingabevektor mit dem numerisch kleinsten Index  $j$  gewählt.

Nach der Bestimmung des Gewinner-Neurons  $q_0$  erfolgt nun eine Anpassung des Gewichtsvektors  $\omega_{q_0}$ , sodass das Gewinner-Neuron feuert und alle anderen Neuronen nicht feuern. Um die Topologie der Wettbewerbsschicht zu erhalten, ähnliche Klassen räumlich zu gruppieren und eine gute Konvergenz der Selbstorganisation zu erreichen, werden die Gewichtsvektoren der Neuronen in der Nähe des Gewinner-Neurons auf eine ähnliche Art angepasst.

Dazu werden zunächst die benachbarten Neuronen des Gewinner-Neurons bestimmt. Der Grad der Nachbarschaft wird anhand einer Nachbarschaftsfunktion  $\eta(\tau)$  bewertet. Die Nachbarschaftsfunktion hängt vom Abstand  $R(\mathbf{h}_j, \mathbf{h}_{q_\tau})$  eines Neurons der Wettbewerbsschicht zum Gewinner-Neuron ab. Im vorliegenden Fall wird der Abstand  $R(\mathbf{h}_j, \mathbf{h}_{q_\tau})$  anhand der Euklidischen Norm bestimmt

$$R(\mathbf{h}_j, \mathbf{h}_{q_\tau}) = \|\mathbf{h}_j - \mathbf{h}_{q_\tau}\|. \quad (3-10)$$

Die Nachbarschaftsfunktion in Abhängigkeit vom Abstand  $R(\mathbf{h}_j, \mathbf{h}_{q_\tau})$  wird dann mit einer mathematischen Funktion gebildet, sodass die Bedingung  $0 \leq \eta(\tau) \leq 1$  erfüllt wird. Prinzipiell können dazu beliebige Funktionen verwendet werden, wobei im Rahmen dieser Arbeit die im Programm Matlab implementierte Funktion **learnsum** verwendet wird. Darin wird standardmäßig die diskrete Formulierung

$$\eta(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{für } A(j, q_\tau) = 1 \\ 0,5 & \text{für } A(j, q_\tau) = 1 \text{ und } R(j, q_\tau) \leq R_\tau \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-11)$$

verwendet [167, 168]. Die Variable  $A$  beschreibt die Erregung des Gewinner-Neurons  $q_\tau$  durch das Neuron  $j$  der Wettbewerbsschicht im Trainingsschritt  $\tau$ . Zu beachten ist, dass die Erregung eines Neurons der Wettbewerbsschicht durch ein anderes Neuron der Wettbewerbsschicht formal als diskrete Funktion beschrieben wird, die nur die Werte 0 und 1 annehmen kann.

$$A(j, q_\tau) = \begin{cases} 1 & \text{falls } q_\tau \text{ Erregung durch } j \text{ erfährt} \\ 0 & \text{falls } q_\tau \text{ keine Erregung durch } j \text{ erfährt} \end{cases} \quad (3-12)$$

$R_\tau$  ist der Abstand eines Neurons, ab dem man von einem benachbarten Neuron spricht. Die Abstände sind prinzipiell frei wählbar, wobei sich in der Literatur, z. B. bei SHORTT, NAUGHTON und JAVIDI [158] sowie bei KANNATHAL et al. [169] Werte finden, die sich für viele Anwendungsfälle etabliert haben. Beim Training wird zwischen der *ordering phase* und der *tuning phase* unterschieden, wobei die Gewichtsvektoren während der *ordering phase* stärker verändert werden. Während der *ordering phase* wird die Nachbarschaft bis zu einem Abstand von  $R_\tau = 3$  definiert und in der *tuning phase* bis  $R_\tau = 1$ . Die Grenze zwischen den beiden Trainingsphasen wird festgelegt. Auch diese ist, wie auch die maximale Anzahl der Trainingsschritte, der

Literatur entnommen (siehe z. B. [158, 169]). Das Training erfolgt mit  $\tau_{max} = 1000$  Trainingsschritten und die Grenze zwischen *ordering phase* und *tuning phase* liegt bei  $\tau_{tuning} = 200$ .<sup>17</sup> Damit im Verlaufe des Trainings die Anpassung der Gewichtsvektoren konvergiert, wird eine Lernrate  $\alpha(\tau)$ , mit  $0 \leq \alpha(\tau) \leq 1$ , eingeführt und für jeden Trainingsschritt  $\tau$  bestimmt.

$$\alpha(\tau) = \begin{cases} 0,9 & \text{für } \tau \leq \tau_{tuning} \\ 0,02 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-13)$$

Nun kann die eigentliche Anpassung des Gewichtsvektors  $\omega_j$  erfolgen. In jedem Trainingsschritt mit einem jeweils neuen Eingabevektor  $x^i$  werden die Gewichtsvektoren  $\omega_j$  nach der Vorschrift

$$\omega_j(\tau + 1) = \omega_j(\tau) + \alpha(\tau)\eta(\tau)(x^i - \omega_j(\tau)) \quad (3-14)$$

bestimmt.

In jedem Trainingsschritt  $\tau$  wird ein zufälliges Objekt als Eingabevektor angelegt. Am Ende des Trainings erfolgt das Clustering, also die eigentliche Klassifikation. Dabei werden nacheinander alle vorliegenden Eingabevektoren an die Eingänge der SOM angelegt, und anhand des jeweils feuern den Ausgabeneurons wird jedem Eingabevektor eine Klasse zugeordnet.

Von diesem Vorgehen unterscheidet sich die Nutzung von KNN zur überwachten Klassifikation. Nachfolgend wird die überwachte Klassifikation mit KNN beschrieben, wie sie in dieser Arbeit in Kapitel 5 Anwendung findet.

Um ein KNN zum überwachten Klassifizieren nutzen zu können, werden zunächst Trainingsdaten benötigt, die aus Objekten  $O$  bestehen, die bekannten Klassen  $K$  zugeordnet werden können. Einem anliegenden Eingabevektor kann so ein Soll-Signal der Ausgabeneuronen zugeordnet werden, da ein Ausgabeneuron oder eine Schar Ausgabeneuronen eine definierte Klasse repräsentiert. Die Gewichtsvektoren des KNN müssen nun so trainiert werden, dass die Ausgänge möglichst exakt den Soll-Signalen entsprechen. Um dies zu erreichen, wird der mittlere quadratische Fehler  $MSE$  zwischen den Netzwerkausgängen  $a$  und den Zielwerten  $K$  (also zu den Klassen), welche die Ausgänge annehmen sollen, minimiert. Bezogen auf Gleichung (3-5) ergibt sich aus den Einträgen der Vektoren  $a$  und  $K$  der  $MSE$  in jedem Trainingsschritt  $\tau$  zu

---

<sup>17</sup> HAN und KAMBER [158] verwenden die gewählten Einstellungen zur Klassifikation (mit einer SOM) eines Beispiels (Bildererkennung) mit über 16.000 Eingangsvariablen und über 200 Klassen. Dabei werden Klassifikationsergebnisse mit unterschiedlichen Lernraten und Klassenanzahlen vorgestellt. Die Anzahl der angegebenen Trainingsschritte wird für das vorgestellte Problem als empfehlenswert angegeben. In der vorliegenden Arbeit sind die Anzahl der Eingangsvariablen sowie die Anzahl der Klassen geringer, sodass die Klassifikationsaufgabe von geringerer mathematischer Komplexität ist. Daher wird davon ausgegangen, dass die SOM beim Training schneller konvergiert und die Anzahl der gewählten Trainingsschritte ausreichend ist. Die Werte der Lernrate  $\alpha(\tau)$  in Gleichung (3-13) sind DEMUTH, BEALE und HAGAN [169] entnommen, wobei sich auch bei HAN und KAMBER [158] vergleichbare Werte finden.

$$MSE_{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (e_j)^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (K^{(j)} - a_j)^2. \quad (3-15)$$

Darin steht  $e_j$  für den Fehler.

Zum Minimieren des  $MSE$  stehen prinzipiell mehrere Algorithmen zur Verfügung. Einer der in Matlab implementierten Algorithmen, der auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, ist der Levenberg-Marquardt-Algorithmus. Dabei handelt es sich um eine erweiterte Form des Gauß-Newton-Verfahrens, welches die Eigenschaft einer stetigen, schnellen Konvergenz bei nicht linearen Problemen aufweist [170].

Das Trainingsverfahren startet mit einer Initialisierung der Gewichtsvektoren  $\omega_j$  mit Zufallszahlen. In jedem Trainingsschritt  $\tau$  werden dann zunächst die Fehler  $e_j$  der Ausgänge bestimmt, die sich direkt aus den Netzwerkausgängen  $a_j$  und den Zielwerten  $K^{(j)}$  ergeben

$$e_j = K^{(j)} - a_j. \quad (3-16)$$

Die Fehler  $e_j$  werden in einem Fehlervektor  $\mathbf{e}$  zusammengefasst und anschließend wird die Jacobi-Matrix

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial \omega_{(1,1)}} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial \omega_{(n,1)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_N}{\partial \omega_{(1,N)}} & \dots & \frac{\partial e_N}{\partial \omega_{(n,N)}} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

des Fehlervektors berechnet, wobei die Fehler nach den Gewichten  $\omega_{(i,j)}$  der Gewichtsvektoren  $\omega_j$  abgeleitet werden. Dazu bedient sich der in Matlab implementierte Algorithmus der Berechnungsvorschrift

$$\frac{\partial e_j}{\partial \omega_{(i,j)}} = \begin{cases} e_j \varphi_j(1 - \varphi_j) & \text{falls } j \text{ ein Ausgabeneuron ist} \\ (\sum g_{jk} \omega_{(i,j)}) \varphi_j(1 - \varphi_j) & \text{falls } j \text{ ein verdecktes Neuron ist} \end{cases} \quad (3-18)$$

deren Herleitung in der Arbeit von MARQUARDT [171] zu finden ist.

Mit der Jacobi-Matrix des Fehlervektors, dem Fehlervektor, den Gewichtsvektoren, der Lernrate und der Einheitsmatrix  $\mathbf{E}$  wird nun der Gewichtsvektor

$$\omega_j(\tau + 1) = \omega_j(\tau) + [\mathbf{J}_{\tau}^T \mathbf{J}_{\tau} + \alpha(\tau) \mathbf{E}]^{-1} \mathbf{J}_{\tau}^T \mathbf{e}_{\tau} \quad (3-19)$$

für die nächste Iteration bestimmt. Als Lernrate  $\alpha(\tau)$  wird die in Gleichung (3-13) angegebene Beschreibung verwendet.

Die beschriebene Prozedur wird fortgeführt, bis die maximale Anzahl Trainingsschritte erreicht ist oder alternativ ein anderes Abbruchkriterium erfüllt wird.

---

### 3.4.3 Clusteranalyse mit dem $k$ -Means-Algorithmus

---

Bei der (unüberwachten) Klassifikation mit dem  $k$ -Means-Algorithmus erfolgt die Gruppierung von Objekten  $O$  zu Klassen  $K$  durch Schwerpunktbildung und Minimierung der Abstände der Objekte zu den Schwerpunkten. Die zu klassifizierenden Objekte werden im Merkmalsraum also derart gruppiert, dass die Summe aller quadratischen Abweichungen zwischen den Datenpunkten  $\mathbf{x}_i$  der Eingabevektoren und den Schwerpunkten  $\boldsymbol{\mu}_c$  der Klassen  $c$  im Merkmalsraum minimal wird. Dies ist exemplarisch anhand von drei Klassen in Abbildung 3-10 dargestellt.

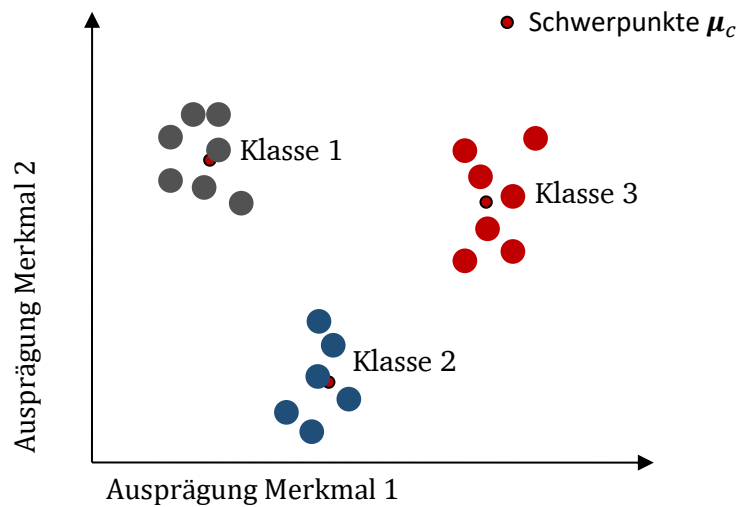


Abbildung 3-10: Schwerpunkte  $\boldsymbol{\mu}_c$  der Klassen  $c$  am Beispiel von drei Klassen und Ausprägungen von zwei Merkmalen

Um die in der Darstellung skizzierte Gruppierung zu erreichen, bedient sich das Verfahren einer zu minimierenden Funktion

$$p_{k\text{-means}} = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^k \|\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_c\|^2. \quad (3-20)$$

Da die Datenpunkte  $\mathbf{x}_i$  als Eingabevektoren unveränderlich sind, werden folglich die Schwerpunkte  $\boldsymbol{\mu}_c$  solange verschoben, bis die Funktion  $p_{k\text{-means}}$  minimal ist. Jedem Eingabevektor  $\mathbf{x}_i$  kann dann ein Schwerpunkt  $\boldsymbol{\mu}_c$  und damit eine Klasse  $c$  zugeordnet werden. Verfahren, die diese Optimierungsaufgabe lösen, sind in den gängigen Programmier- und Analysesystemen integriert und verfügbar. Im verwendeten Programmsystem Matlab ist der  $k$ -Means-Algorithmus in Form des Algorithmus nach LLOYD [172] implementiert [167].

Der  $k$ -Means-Algorithmus nach LLOYD optimiert die in Gleichung (3-20) definierte Funktion  $p_{k\text{-means}}$  iterativ. Zunächst werden in einem Initialisierungsschritt die  $c$  Vektoren der Schwerpunkte  $\boldsymbol{\mu}_c$  mit Zufallszahlen aufgefüllt. Anschließend wird jedem durch den Eingabevektor  $\mathbf{x}_i$  repräsentierten Datenpunkt eine Klasse  $K^{(c)}$  zugewiesen. Dies geschieht über die Vorschrift

---


$$K^{(c)}(\mathbf{x}_i) = \arg \min_c \|\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_c\|^2, \quad (3-21)$$

die jedem Eingabevektor  $\mathbf{x}_i$  genau die Klasse  $K^{(c)}(\mathbf{x}_i)$  zuordnet, deren Schwerpunkt  $\boldsymbol{\mu}_c$  den geringsten Abstand zu ihm hat. Nach der erfolgten Zuordnung werden die Schwerpunkte der Klassen neu berechnet. Sie ergeben sich direkt aus den Eingabevektoren, die einer Klasse zugeordnet wurden

$$\boldsymbol{\mu}_c = \frac{1}{c_N} \sum_j \mathbf{x}_j \quad \text{für alle } \mathbf{x}_j \in K^{(c)}, \quad (3-22)$$

wobei  $c_N$  für die Anzahl der Datenpunkte  $\mathbf{x}_i$ , die der Klasse  $K^{(c)}$  zugeordnet werden, steht. Danach wiederholt sich der Prozess beginnend mit der Zuweisung der Datenpunkte zu einer Klasse und endend mit der Neuberechnung der Schwerpunkte der Klassen. Der Algorithmus wird beendet, sobald sich nach einer Iteration die Schwerpunkte der Klassen sowie die Zuweisungen der Datenpunkte nicht mehr ändern. Aufgrund der nicht veränderlichen Datenpunkte bedeutet das, dass die Konvergenz der Klassenschwerpunkte

$$\boldsymbol{\mu}_c^{\tau+1} = \boldsymbol{\mu}_c^{\tau} \quad (3-23)$$

den Algorithmus beendet.

---

### 3.5 Berücksichtigung von Expertenwissen und wissensbasierte Systeme

---

Oftmals liegt Wissen über bestimmte Systemeigenschaften oder über deren Auswirkungen auf das Systemverhalten in Form von Erfahrungswissen, was häufig als Expertenwissen bezeichnet wird, vor. Dieses Wissen beinhaltet oftmals auch Sachverhalte, die in der entwicklungsbegleitenden Simulation nicht berücksichtigt werden. Es handelt sich daher um eine Sonderform formal nicht unmittelbar belegbarer Fakten. Im Entwicklungsprozess wird dieses Wissen dahingehend ausgenutzt, dass bestimmte Systemkonfigurationen oder Teillösungen verworfen werden. Eine Möglichkeit, dieses Wissen auch anderen Entwicklern zugänglich zu machen, sind Expertensysteme. Darin werden anhand von eingegebenen Informationen Handlungsempfehlungen und Hinweise bereitgestellt.

Üblicherweise werden derartige Systeme auf zwei Weisen aufgebaut. Entweder es werden Entscheidungsbäume modelliert oder aber Handlungsempfehlungen aus einer Auswahlmatrix abgeleitet und dem Anwender ausgegeben.

KOLLMANN und HIRSCH [14] stellen ein derartiges System im Bereich der Akustik vor. Allerdings finden sich keine Hinweise darauf, dass das entwickelte System oder ihm vergleichbare wissensbasierte Systeme in der industriellen Praxis Anwendung finden. Ursächlich dafür dürfte die Komplexität der akustischen Problemstellungen im Entwicklungsprozess sein, die in einem sehr umfangreichen Lösungsraum resultiert, der algorithmisch schwer abzubilden ist.

---

Im folgenden Kapitel 4 wird das Ableiten von Regeln zur schallleistungsgerechten Bewertung von Schwingformen vorgestellt. Eine Umsetzung dieser Regeln in Softwaresystemen würde ebenfalls eine Art wissensbasiertes System darstellen.



---

## 4 Identifikation schallleistungsproportionaler Eigenschaften

---

Die Identifikation schallleistungsproportionaler Eigenschaften von Schnellefeldern steht im Fokus der vorliegenden Arbeit. In den vorherigen Abschnitten wurde die Motivation für die Fragestellung erörtert und aufgezeigt, dass es einerseits Lücken im Wissen über die Schallabstrahlung von Schnellefeldern gibt und andererseits eine schallleistungsgerechte Bewertung von Vorteil wäre. Weiterhin wurde ein Data-Mining-Prozess vorgestellt, der dem Auffinden von Mustern und Ableiten von Regeln aus Datenbeständen dient. Im vorherigen Abschnitt wurden außerdem mathematische Verfahren erläutert, die im Rahmen des vorgestellten Data-Mining-Prozesses angewandt werden können.

Im Folgenden soll nun der in Abschnitt 3.1 beschriebene Prozess zur Beantwortung der in Abschnitt 2.5 aufgeworfenen Forschungsfrage eingesetzt werden. Das bedeutet, dass zunächst eine Anpassung des Prozesses zur Auswertung von akustischen Daten durchgeführt werden muss. In diesem Zusammenhang müssen außerdem Kriterien zur Bewertung festgelegt werden. Diese Schritte werden in Abschnitt 4.1 durchgeführt.

Zur Anwendung des Prozesses müssen auch akustische Daten generiert werden, was in der vorliegenden Arbeit mittels numerischer Simulationen geschieht. Die verwendete Teststruktur sowie das Anregungsszenario zur Datengenerierung werden in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. Das verwendete Simulationsmodell wird im Anhang beschrieben.

Zentrale Aspekte sind die Bewertung der Ergebnisse sowie die Merkmalsextraktion und Regelableitung. Auch die Generalisierung der Ergebnisse und die Grenzen der Methode müssen bekannt sein, um eine zielführende Anwendung gewährleisten zu können.

Zunächst wird der angepasste Data-Mining-Prozess in den folgenden Abschnitten beschrieben. Anschließend erfolgt die Anwendung des Prozesses auf die generierten Testdaten. Außerdem werden zwei Anwendungsbeispiele gegeben. Der Prozess beginnt mit der Problemspezifikation.

---

### 4.1 Problemspezifikation

---

Zu Beginn muss in der *Problemspezifikation* geklärt werden, wie die dieser Arbeit zugrunde liegende Problemstellung konkret beschrieben werden kann und welches konkrete Ziel verfolgt werden soll. Die Problemstellung ist mit der bereits prägnant formulierten Forschungsfrage I in Abschnitt 2.5 ausreichend spezifiziert.

Als Ziel kann demnach festgelegt werden, dass vorliegende Schwingformen hinsichtlich der von ihnen abgestrahlten Schallleistung bewertet werden sollen. Konkret soll es möglich sein, aus einer vorliegenden Schwingform Rückschlüsse auf die abgestrahlte Schallleistung ziehen zu können, ohne dazu eine numerische oder analytische Schallabstrahlungsberechnung durchführen zu müssen.

---

Weiterhin müssen in dieser Phase Kriterien zur Ergebnisevaluation definiert werden. Dazu eignet sich im vorliegenden Fall als abstraktes Ziel die Prognosequalität der Bewertung einer Schwingform. Diese kann durch den prozentualen Anteil richtig bewerteter

$$\% \text{ richtige Bewertung} = 100 \frac{\text{Anzahl richtig bewerteter Schwingformen}}{\text{Anzahl vorliegender Schwingformen}} \quad (4-1)$$

oder falsch bewerteter Schwingformen

$$\% \text{ falsche Bewertung} = 100 \frac{\text{Anzahl falsch bewerteter Schwingformen}}{\text{Anzahl vorliegender Schwingformen}} \quad (4-2)$$

aus einer Testmenge vorliegender Schwingformen konkret ausgedrückt werden.

Problematisch ist dabei allerdings die Unterscheidung in *richtig* und *falsch*, da unter bestimmten Umständen auch richtige Bewertungen nicht von praktischem Nutzen sein können. Sinnvoller erscheint der Anteil nutzbarer Prognosen

$$\% \text{ nutzbare Bewertung} = 100 \frac{\text{Anzahl nutzbarer Bewertungen}}{\text{Anzahl aller Bewertungen}} \quad (4-3)$$

als Maß zur Evaluation der Ergebnisse.

---

## 4.2 Datenbeschaffung

---

Im Arbeitsschritt *Datenbeschaffung* sind im Rahmen vom *CRISP-DM* die verfügbaren und geeigneten Datenquellen zu identifizieren sowie die Daten in ein geeignetes Datenverarbeitungssystem zu integrieren. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dienen Simulationsergebnisse aus einem numerischen Experiment als Datenbasis.

Die Nutzung von selbst erzeugten Daten hat mehrere Vorteile. Erstens ist damit die Datenquelle bekannt und eine Verwechslung oder Fehlinterpretation von Datensätzen ist praktisch ausgeschlossen. Zweitens können die Daten so erzeugt werden, dass quasi ideale Daten vorliegen, die weitgehend frei von Störeinflüssen sind und die gleichen systematischen Fehler enthalten. Ein weiterer Vorteil ist, dass man die Daten vor der Nutzung einfach auf Plausibilität überprüfen kann.

Da die Daten für diese Phase des Data-Mining-Prozesses mittels eines eigens für diesen Zweck konzipierten numerischen Experimentes erzeugt wurden, wird nachfolgend auf diesen Sachverhalt in eigenen Unterkapiteln näher eingegangen. Dabei wird sowohl auf die Anforderungen an die nötige Datenbasis als auch auf das numerische Modell eingegangen. Außerdem werden die Simulationsergebnisse vorgestellt.

---

## 4.2.1 Generierung von Testdatensätzen zur Merkmalsextraktion

---

Zur Beantwortung der Fragestellung mit Hilfe eines Data-Mining-Prozesses können prinzipiell beliebige Simulations- oder Messdaten verwendet werden, sofern die Datensätze Informationen über die Schwingformen und die jeweils abgestrahlte Schallleistung enthalten. Allerdings würde die willkürliche Verwendung von Datensätzen einerseits die Datenaufbereitung erheblich erschweren und andererseits würde eine Datenbasis von erheblichem Umfang benötigt. Letzteres liegt daran, dass die Beliebigkeit an Datensätzen quasi alle geometrischen Ausprägungen flächiger Strukturen enthalten könnte. Da man für jede Ausprägung einen angemessenen Stichprobenumfang benötigt, müsste folglich eine Datenbasis mit sehr vielen Datensätzen zur Verfügung stehen und untersucht werden.

Eine Möglichkeit, die Anzahl benötigter Datensätze zu begrenzen, ist die Einschränkung des zugrunde gelegten Untersuchungsgebietes. Außerdem bietet es sich an, eine Geometrie zu verwenden, die sowohl akademisch als auch praktisch häufig angewandt wird. Aus den vorgenannten Erwägungen dient im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Rechteckplatte als Teststruktur zur Erzeugung der dem Data-Mining-Prozess zugeführten Datenbasis. Rechteckplatten dienen einerseits häufig als Untersuchungsgegenstand in akademischen Arbeiten und werden andererseits auch in der Praxis häufig angewandt. Folglich können die erzeugten Ergebnisse auch einfacher validiert werden als es im Fall einer komplexen Struktur der Fall wäre.

---

### 4.2.1.1 Teststruktur modifizierte Rechteckplatte

---

Als Teststruktur dient eine ebene Rechteckplatte aus einer Aluminiumlegierung mit einer Stärke von 0,8 mm, einer Länge von 300 mm und einer Breite von 260 mm, siehe Abbildung 4-1.

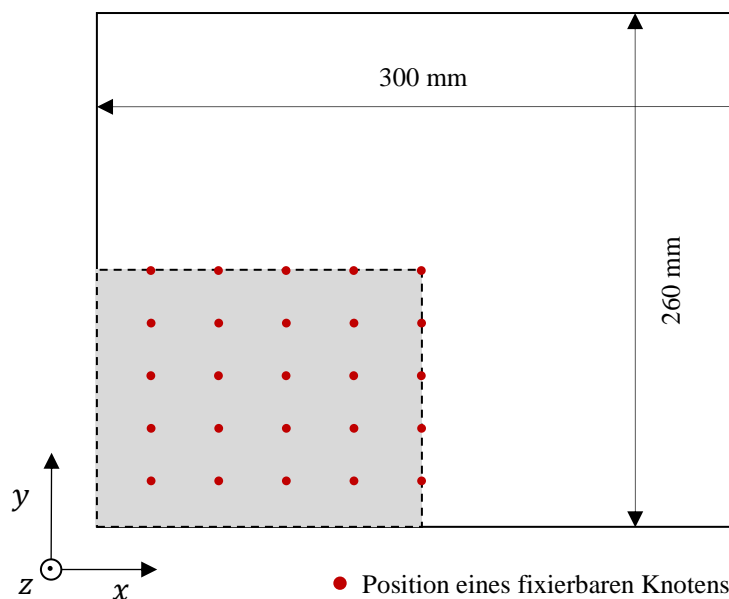


Abbildung 4-1: Platte mit fixierbaren Knoten und zugrunde gelegtes Koordinatensystem

Die modifizierte Rechteckplatte ist als FE-Modell implementiert und verfügt über 25 Knoten in einem Quadranten, die einzeln fixiert werden können. Das bedeutet, dass alle Freiheitsgrade der Knoten  $K$  zu null gesetzt werden. Alle fixierbaren Knoten unterliegen also der schiefen Randbedingung

$$w(x_K, y_K, t) = \frac{\partial w(x_K, y_K, t)}{\partial x} = \frac{\partial w(x_K, y_K, t)}{\partial y} = 0, \quad (4-4)$$

wobei  $w$  die Auslenkung der Platte in  $z$ -Richtung kennzeichnet. Abbildung 4-1 zeigt die Positionen der fixierbaren Knoten auf der Platte. Die Koordinaten der fixierbaren Knoten sind in Tabelle A-1 im Anhang Teil A dieser Arbeit aufgeführt.

Für die Platteneinspannung an den Plattenrändern gilt ebenfalls eine vollständige Beschränkung der Freiheitsgrade, was formal

$$w(x_{\text{Rand}}, y_{\text{Rand}}, t) = \frac{\partial w(x_{\text{Rand}}, y_{\text{Rand}}, t)}{\partial x} = \frac{\partial w(x_{\text{Rand}}, y_{\text{Rand}}, t)}{\partial y} = 0 \quad (4-5)$$

bedeutet.

Diese modifizierte Rechteckplatte dient der Erzeugung „entarteter“ Schwingformen als Erweiterung der bekannten Schwingformen, die Rechteckplatten mit Randeinspannung üblicherweise aufweisen. Nachfolgend ist exemplarisch die Veränderung der ersten Eigenmode in Abhängigkeit von der Position des fixierten Knotens zur Verdeutlichung dargestellt.

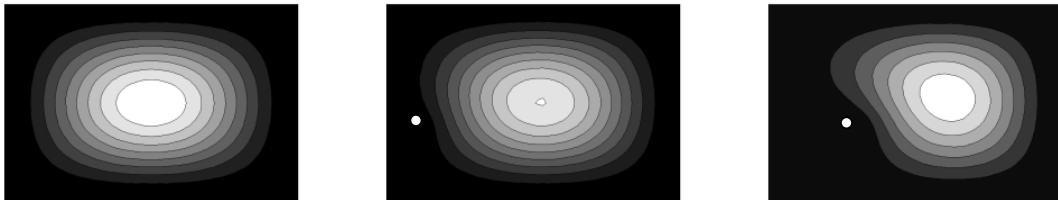


Abbildung 4-2: Normierte Deformation der ersten Platteneigenmode (schwarz minimale, weiß maximale Verschiebung) in Abhängigkeit von der Position des fixierten Knotens (weißer Punkt, links ohne fixierten Knoten)

#### 4.2.1.2 Anregungsszenario und Implementierung der Akustiksimulationen

Die Platte befindet sich im numerischen Experiment in einer unendlich ausgedehnten Blende, sodass nur die Schallabstrahlung von einer Plattenseite berücksichtigt wird. Für die Simulation werden als Werkstoffparameter ein E-Modul von  $E = 70 \text{ MPa}$ , eine Querkontraktionszahl von  $\nu = 0,34$  sowie eine Dichte von  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$  verwendet.

Die Schallabstrahlung im Frequenzbereich unterhalb der Koinzidenzfrequenz ist in den Schwingformen der Eigenfrequenzen besonders ausgeprägt. Aus diesem Grund sollen insbesondere die Eigenschwingformen zu Schwingungen angeregt werden, um sie auf ihre Schallabstrahlung hin zu untersuchen.

In der Praxis stellt die Anregung einer einzelnen Eigenform ein unmögliches Vorhaben dar, da die angeregte Struktur immer mit allen Eigenschwingformen antwortet, die an der Anregungsstelle keinen Schwingungsknoten aufweisen. Um dennoch möglichst ausschließlich die Schallabstrahlung der anzuregenden Eigenschwingform als Simulationsergebnis zu erhalten, ist eine möglichst ideale Anregung dieser Schwingform erforderlich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit dient dazu ein spezielles Anregungsszenario.

Dabei wird zunächst eine Modalanalyse unter der jeweiligen Randbedingung (Knoten  $K$ ) durchgeführt. Anschließend wird für jede Schwingform  $i$  der Ort der geringsten Eingangsimpedanz  $(x_{E,K,i}, y_{E,K,i})$  bestimmt. Dazu wird von der Annahme ausgegangen, dass die geringste Eingangsimpedanz  $Z_E$  an der Stelle vorliegt, an der die Eigenform die betragsmäßig größte Auslenkung hat.

Im nächsten Schritt wird am Ort der jeweils geringsten Eingangsimpedanz  $(x_{E,K,i}, y_{E,K,i})$  eine harmonische Kraft  $F$  appliziert, die normal zur Plattenoberfläche wirkt. Dabei wird für die anregende Kraft stets die jeweilige Eigenfrequenz gewählt. Auf diese Weise wird die zur jeweiligen Eigenfrequenz  $f_i$  gehörende Eigenschwingform (Eigenvektor)  $\varphi_i$  bestmöglich angeregt. Zwar werden auch auf diese Weise andere Eigenformen mit angeregt, allerdings in einem Maße, dass bei der Strukturantwort von einer dominanten Beteiligung der beabsichtigt angeregten Eigenform auszugehen ist. Als Vorgriff auf die Simulationsergebnisse kann an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen werden, dass die Beteiligung anderer Schwingformen, die auch modale Partizipation genannt wird, bei allen Simulationsergebnissen gering ausgefallen ist. Konkret lag die modale Partizipation bei allen erzeugten Datensätzen maximal bei ca.  $-20$  dB.

Eine ausführliche Beschreibung des Anregungsszenarios findet sich in Abschnitt A des Anhangs. Dort werden auch die Details der Implementierung der Teststruktur in einem FEM-BEM-System erläutert.

Als direkte Simulationsergebnisse fallen aus der Modalanalyse die Eigenschwingformen  $\varphi_i$  und Eigenfrequenzen  $f_i$  an. Diese ergeben sich aus der Lösung des Eigenwertproblems [173]

$$[\mathbf{K} - \Omega_i^2 \mathbf{M}] \varphi_i = 0, \quad (4-6)$$

in dem zwischen der Eigenfrequenz  $f_i$  und der Eigenkreisfrequenz  $\Omega_i$  der allgemein bekannte Zusammenhang  $\Omega_i = 2\pi f_i$  besteht. Das Eigenwertproblem (4-6) ergibt sich aus der Beschreibung des diskreten, linearen Systems

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{w}} + \mathbf{K}\mathbf{w} = \mathbf{F}(t), \quad (4-7)$$

als welches sich die modifizierte Rechteckplatte abstrahieren lässt, durch Anwendung des Gleichtakt-Ansatzes

$$\mathbf{w} = \hat{\mathbf{w}} e^{j\Omega t} \quad (4-8)$$

unter der Annahme, dass das System freie Schwingungen ausführt ( $\mathbf{F}(t) = 0$ ). In den Gleichungen (4-6) und (4-7) beschreibt  $\mathbf{M}$  die Massenmatrix und  $\mathbf{K}$  die Steifigkeitsmatrix. Die Dämpfung, die in technischen Systemen immer vorliegt, wird im Rahmen der Arbeit durch Anwendung der Bequemlichkeitshypothese [173] abgebildet. Demzufolge wird die Beschreibung (4-7) um einen geschwindigkeitsproportionalen Anteil mit einer Dämpfungsmatrix  $\mathbf{D}$  erweitert

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{w}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{w}} + \mathbf{K}\mathbf{w} = \mathbf{F}(t). \quad (4-9)$$

Liegen die Eigenschwingformen  $\boldsymbol{\varphi}_i$  in einer Matrix

$$\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2, \dots, \boldsymbol{\varphi}_n] \quad (4-10)$$

vor<sup>18</sup>, können die Systemmatrizen  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D}$  und  $\mathbf{K}$  diagonalisiert werden.

Die anschließend durchgeführte harmonische Analyse liefert die Verschiebungen  $\mathbf{w}$  und die Schnellefelder der jeweils erzeugten Schwingformen. Dazu bietet sich das Prinzip der modalen Superposition an. Die Verschiebung  $\mathbf{w}$  der Platte kann anhand der Formulierung

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varphi}_i \gamma_i \quad (4-11)$$

berechnet werden. Die Ausdrücke  $\gamma_i$  werden durch die Substitution der Freiheitsgrade in (4-9) mit (4-11) und anschließende Linksmultiplikation beider Seiten der entstehenden Gleichung mit  $\boldsymbol{\Phi}^T$  bestimmt. Als abgeleitete Größen werden die Eingangsleistung  $P_E$  am Krafteinleitungsort sowie die mittlere quadratische Oberflächenschnelle  $\overline{\tilde{v}^2}$  bestimmt. Die effektive Eingangsleistung ergibt sich aus der Multiplikation der effektiven Erregerkraft  $\tilde{F}$  mit der sich am Krafteinleitungsort  $(x_{E,K,i}, y_{E,K,i})$  einstellenden Schnelle  $\tilde{v}_E$  und die mittlere quadratische Oberfläche aus der Mittelung der über die abstrahlende Oberfläche  $S$  flächengewichtet summierten, quadrierten Oberflächenschnellen.

Im letzten Schritt erfolgen die Berechnung der abgestrahlten Schallleistung und die Ableitung des Abstrahlgrades. Liegen die Verschiebungen der Platte  $\mathbf{w}$  und damit auch die Oberflächen- geschwindigkeiten vor, kann unter Verwendung einer BEM-Formulierung von VISSER [174] die von der Plattenoberfläche  $S$  abgestrahlte Schallleistung  $P$  anhand der Beziehung

$$P = \frac{1}{2} \oint_S (v_n p(x)) dS \quad (4-12)$$

---

<sup>18</sup> Ein lineares, diskretes System mit  $n$  Freiheitsgraden wird durch ein Gleichungssystem mit  $n$  Gleichungen beschrieben und die Lösung des korrespondierenden Eigenwertproblems liefert  $n$  Eigenwerte.

berechnet werden. Darin steht  $v_n$  für die normale Oberflächenschnelle der Platte, die der ersten Zeitableitung der Verschiebung der Platte in  $z$ -Richtung entspricht

$$v_n = \dot{w}(x, y)_z, \quad (4-13)$$

und  $p(\mathbf{x})$  bezeichnet den Schalldruck an einem beliebigen Punkt  $\mathbf{x}$  auf der Platte oder im Raum. Der Schalldruck  $p(\mathbf{x})$  kann mittels der Beziehung

$$\alpha(\mathbf{x})p(\mathbf{x}) = \oint_S (i\Omega\rho_0 G(r)v_n) dS \quad (4-14)$$

berechnet werden. Darin stehen die Ausdrücke  $\rho_0$  für die Dichte von Luft,  $G(r)$  für die Greensche Funktion

$$G(r) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \quad (4-15)$$

und  $\alpha(\mathbf{x})$  kann die diskreten Werte  $\alpha(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}$  und  $\alpha(\mathbf{x}) = 1$  annehmen. Liegt der Punkt  $\mathbf{x}$  direkt auf der Plattenoberfläche, ist  $\alpha(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}$ . Liegt  $\mathbf{x}$  nicht auf der Plattenoberfläche, ist  $\alpha(\mathbf{x}) = 1$ . In Gleichung (4-15) steht  $k$  für die Wellenzahl und  $r$  beschreibt den Abstand zwischen dem Feldpunkt  $\mathbf{x}$  und dem Punkt, an dem die normale Oberflächenschnelle  $v_n$  auftritt.

Liegen die Schallleistung  $P$  und die effektive, mittlere quadratische Oberflächenschnelle  $\bar{v}^2$  der Struktur vor, kann mit der maschinenakustischen Grundgleichung (2-1) der Abstrahlgrad  $\sigma$  berechnet werden.

#### 4.2.2 Simulationsergebnisse der modifizierten Rechteckplatte

Eine Übersicht über die insgesamt 390 erzeugten Simulationsergebnisse sollen die folgenden Abbildungen ermöglichen. Im Vordergrund stehen dabei der Realteil der abgestrahlten Schallleistung sowie die Plausibilität der erzielten Ergebnisse.

Eine deutliche Streuung des Pegels des Realteils der abgestrahlten Schallleistung in den jeweils angeregten Schwingformen zeigt Abbildung 4-3. Auffallend ist, dass manche Schwingformen eine stärker ausgeprägte Streuung im Frequenzbereich aufweisen als andere. So reicht beispielsweise der Frequenzbereich der ersten Eigenmode von ca. 93 Hz bis etwa 185 Hz. Betrachtet man aber die zehnte Eigenmode, so variiert diese nur in einem Bereich von ca. 568 Hz bis ca. 585 Hz. Es ist ebenfalls offensichtlich, dass sich zwar tendenziell eine Zunahme des Realteils der abgestrahlten Schallleistung mit zunehmender Frequenz einstellt, aber im Frequenzbereich höher liegende Vorkommen einer einzelnen Schwingform nicht automatisch einen höheren Realteil der Schallleistung abstrahlen. In den nachfolgenden Pegeldarstellungen werden die

Referenzschallleistung  $P_0 = 10^{-12}$  W sowie die Referenzschnelle  $v_0 = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bei der Pegelbildung zugrunde gelegt.

Ein wichtiger Zusammenhang, der insbesondere im Kontext der Produktentwicklung von Interesse ist, ist der Zusammenhang zwischen der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle oder der *ERP* und dem Realteil der abgestrahlten Schallleistung. Wie einleitend in Kapitel 2 dargelegt, wird die mittlere quadratische Oberflächenschnelle oder die *ERP* als gut zugängliches Substitut zur akustischen Bewertung im Hinblick auf die abgestrahlte Schallleistung verwendet.

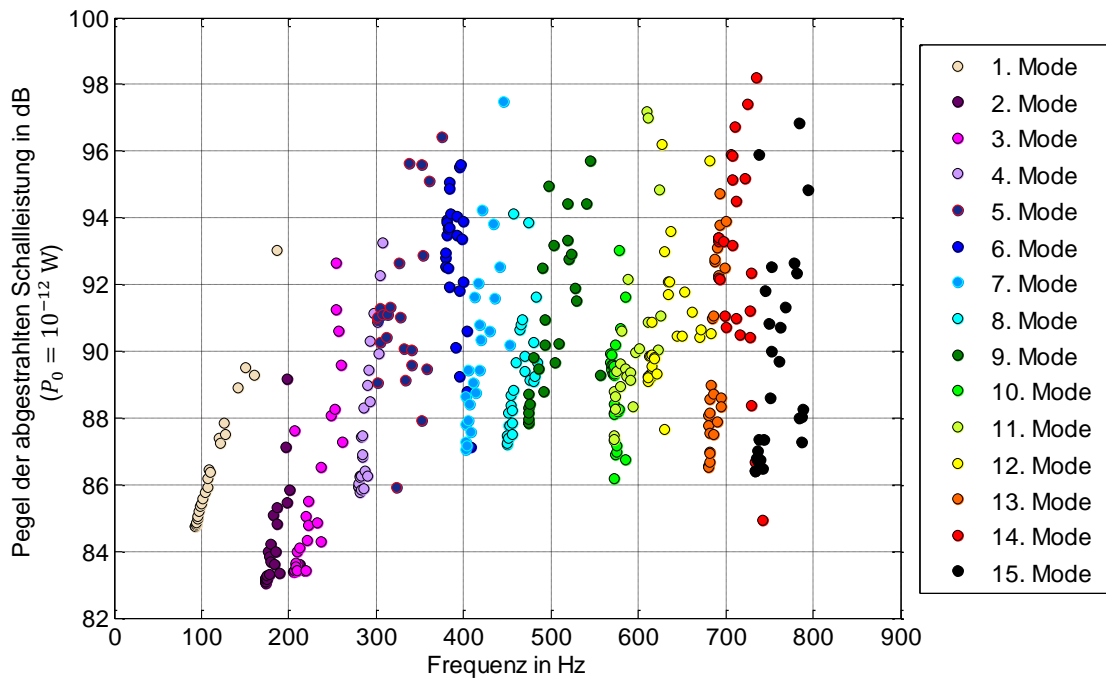


Abbildung 4-3: Pegel des Realteils der abgestrahlten Schallleistung der jeweils angeregten Schwingformen

In Abbildung 4-4 sind die Pegel der Realteile der abgestrahlten Schallleistungen über den Pegeln der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen der erzeugten Samples dargestellt. Es ist kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen dem Realteil der Schallleistung und der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle erkennbar, was formal durch einen Korrelationskoeffizienten<sup>19</sup> von  $r_{p,\bar{v}^2} = -0,3376$  bestätigt wird. Dieser Sachverhalt ist ein zu erwartendes Ergebnis und prinzipiell keine neue Erkenntnis. Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen aber anschaulich, dass die Verwendung der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle als Substitut für die abgestrahlte Schallleistung (Realteil) nicht geeignet ist.

<sup>19</sup> Die verwendeten Berechnungsvorschriften für den Korrelationskoeffizienten finden sich in Anhang B.



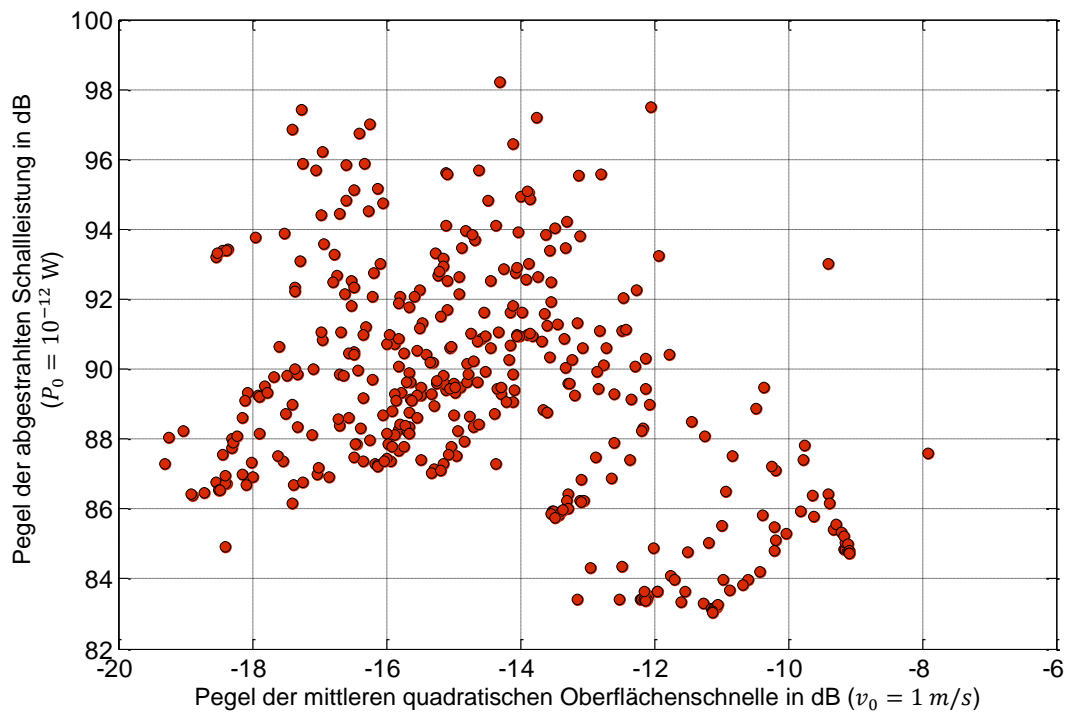


Abbildung 4-4: Pegel des Realteils der abgestrahlten Schallleistung und Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle aller Samples

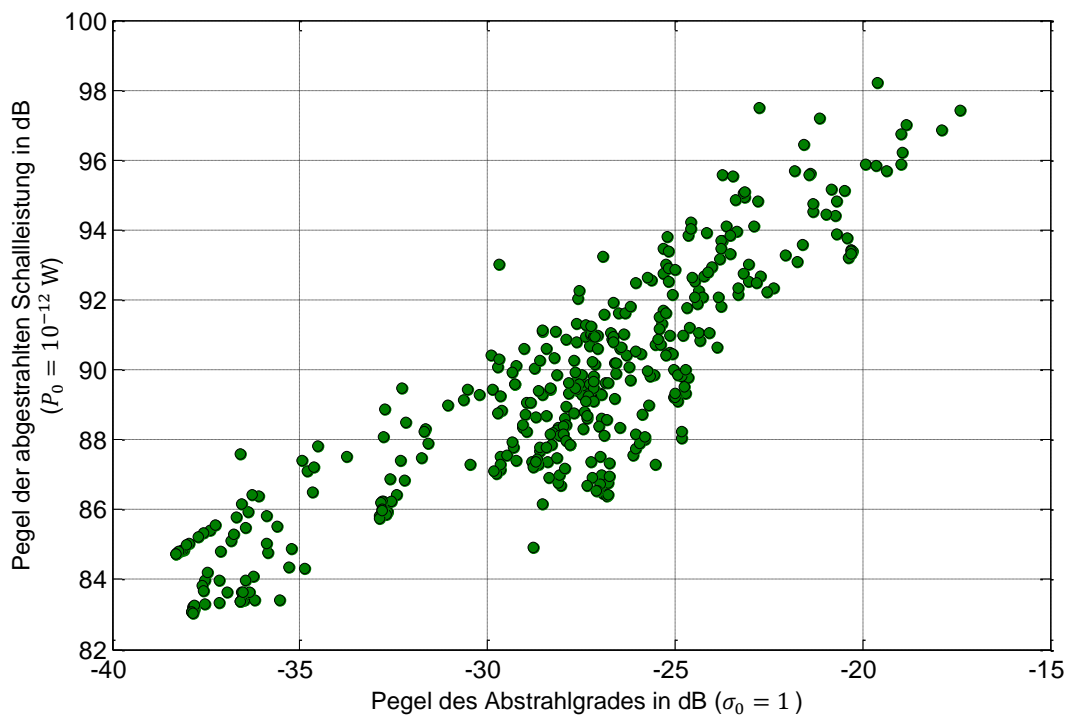


Abbildung 4-5: Pegel des Realteils der abgestrahlten Schallleistung und Pegel des Abstrahlgrades aller Samples

Abbildung 4-5 veranschaulicht die Pegel der Realteile der abgestrahlten Schallleistung über den Pegeln der Abstrahlgrade. Man erkennt eine deutliche Korrelation beider Größen mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r_{p,\sigma} = 0,8819$ .

---

Dennoch führt die Reduktion der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle in der Praxis häufig zu einer Minderung der abgestrahlten Schallleistung. Das kann damit erklärt werden, dass in vielen Anwendungsfällen keine oder nur eine unwesentliche Änderung der berücksichtigten Schwingformen stattfindet. Innerhalb von Schwingformen, die einer Mode zugeordnet werden können, ist die Korrelation zwischen Oberflächenschnelle und Schallleistung in der Regel hoch. Dieser Sachverhalt stützt auch die Klassifikation von Schwingformen im Hinblick auf ihr Abstrahlverhalten.

Eine in dieser Phase zu erörternde Problemstellung ist, ob die Anzahl von 390 Samples für die Beantwortung der eingangs formulierten Fragestellung ausreichend ist. Dazu muss zunächst klargestellt werden, dass prinzipiell eine einzige Schwingform ausreicht, um sie als Repräsentation einer Klasse heranziehen zu können. In einem solchen Fall würde der Klassifikator derart trainiert werden, dass er nur Schwingformen identifiziert, die der ersten Trainingsschwingform entsprechen oder ihr sehr ähnlich sind. Es ist also grundsätzlich nicht erforderlich, eine Datenbasis zu schaffen, die für jede Gruppe von Schwingformen eine bestimmte Anzahl an Stichproben enthält. Es ist vielmehr von Vorteil, eine möglichst große Anzahl unterschiedlicher Schwingformen zu generieren.

Ebenfalls Bestandteil dieser Phase des Prozesses ist die Integration der Daten, also der Simulationsergebnisse, in eine Simulationsumgebung. Als Simulationsumgebung dient im vorliegenden Fall Matlab. Die Simulationsergebnisse werden in Form von eindeutigen Variablen gespeichert. Die Datenstruktur sowie die Implementierung erfolgt, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, nach ANDREJEV et al. [175]. Kern der Datenbasis sind die Schnellefelder, die über eine eindeutige *ID* identifizierbar sind und eine eindeutige Ressource im Sinne einer RDF-Beschreibung darstellen. Jeder dieser Schwingformen können eindeutige Eigenschaften zugeordnet werden. Die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Eigenschaften sind in Tabelle 3-1 in Abschnitt 3.2 aufgeführt. Jeder eindeutigen *ID* können nachträglich weitere Eigenschaften zugeordnet werden, wie z. B. eine Klasse.

Nachdem nun die Datenbasis für das eigentliche Data-Mining vorliegt, erfolgt gemäß CRISP-DM der Übergang zur Phase Data-Mining.

---

### **4.3 Data-Mining – Klassifizierung der Schwingformen**

---

In dieser Phase erfolgt die Simulation der Daten, das eigentliche *Data-Mining*. Da die Zielsetzung des Prozesses das Erkennen und Bewerten von Schwingformen ist, ist das Klassifizieren von Schwingformen die entscheidende Aufgabe in dieser Phase. Die Klassifizierung kann dabei auf zwei prinzipiell unterschiedliche Weisen erfolgen: überwacht und unüberwacht.

### 4.3.1 Überwachte Klassifizierung der Schwingformen

Ein möglicher Ansatz der Klassifikation der vorliegenden Daten ist die Nutzung vorhandener Informationen. In diesem Fall können Schwingformen mit einer ausgeprägten akustischen Eigenschaft, wie z. B. Abstrahlgrad oder Schallleistung, dazu genutzt werden, um eine Klasse mit dieser Eigenschaft zu repräsentieren.

Im Rahmen der Arbeit werden jeweils die fünf Schwingformen mit den höchsten Abstrahlgraden als Trainingsdaten für ein KNN herangezogen. Anschließend werden die entstandenen KNN als Klassifikatoren genutzt, um Schwingformen mit ähnlichen Eigenschaften innerhalb der Datensätze zu identifizieren. Dabei ist es das Ziel, dass möglichst ähnliche Schwingformen klassifiziert werden, die ebenfalls hohe Abstrahlgrade aufweisen. Die fünf Schwingformen der Datenbasis, die die höchsten Abstrahlgrade aufweisen, sind in Abbildung 4-6 dargestellt. Die Darstellung ist auf die jeweils maximale Oberflächengeschwindigkeit normiert.

Um ähnlich ausgeprägte Schwingformen oder Schwingformen mit ähnlichen Eigenschaften zu identifizieren, bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten der Klassifikation:

- I. Die fünf Schwingformen dienen als Trainingsdaten für einen Klassifikator, der nur eine Klasse kennt.
- II. Jede der fünf Schwingformen dient zum Training eines Klassifikators, der fünf Klassen (jede Klasse repräsentiert eine der Schwingformen) kennt.

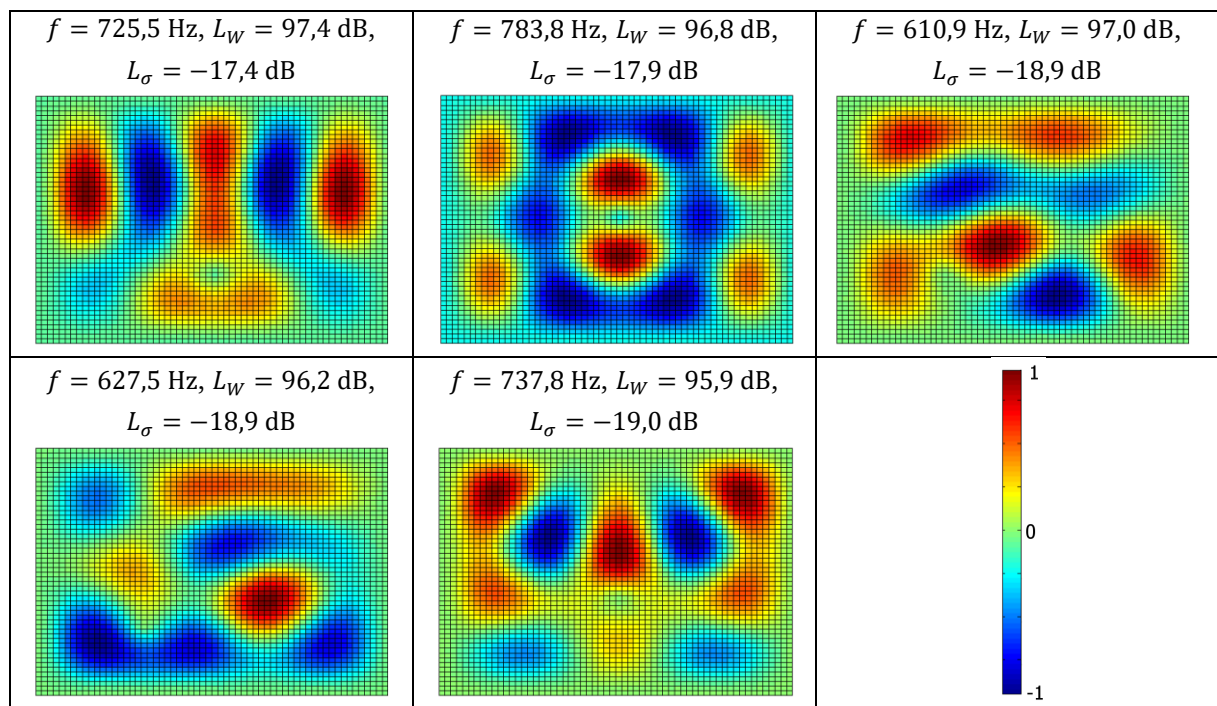


Abbildung 4-6: Schwingformen mit den höchsten Abstrahlgraden (normierte Darstellung)

---

Klassifiziert man anschließend die restlichen 385 Schwingformen, ist im unter I. genannten Fall davon auszugehen, dass Schwingformen klassifiziert werden, die Eigenschaften aller fünf Schwingformen aufweisen. Dabei besteht das Risiko, dass möglicherweise Schwingformen klassifiziert werden, die Mischformen der Trainingsdaten darstellen und folglich keine vergleichbaren Abstrahlgrade aufweisen.

Wendet man den unter I. beschriebenen Klassifikationsansatz auf die in Abbildung 4-6 dargestellten Schwingformen an, entsteht ein Klassifikator, der bei Anwendung auf die restlichen 385 Schwingformen keine Schwingformen klassifiziert.

Klassifiziert man auf die unter II. genannte Weise die übrigbleibenden 385 Schwingformen, sollten nur Schwingformen erkannt werden, die den jeweiligen Trainingsschwingformen entsprechen. Es besteht jedoch das Risiko, dass aufgrund der Trainingsdaten eine Übertrainierung des Klassifikators stattfindet und folglich keine ähnlichen, sondern nur praktisch identische Schwingformen erkannt werden.

Der unter II. beschriebene Klassifikationsansatz führt ebenfalls zu einem Klassifikator, der bei Anwendung auf die restlichen Datensatz keine Schwingformen klassifiziert.

Die überwachte Klassifikation führt im vorliegenden Fall folglich nicht zu verwertbaren Ergebnissen. Das bedeutet außerdem, dass die Schwingformen mit den stärksten Abstrahlgraden keine verallgemeinerbaren Eigenschaften haben, die im Rest des Datensatzes vorkommen.

Im nächsten Schritt erfolgt aufgrund der oben beschriebenen Ergebnisse die Klassifikation unüberwacht. Dabei wird das Ziel verfolgt, Klassen mit ähnlichen Schwingformen zu bilden, die über ähnliche Eigenschaften verfügen.

---

#### **4.3.2 Unüberwachte Klassifizierung der Schwingformen**

---

Bei der unüberwachten Klassifikation (Clustering) wird das Ziel verfolgt, Klassen mit ähnlichen Schwingformen zu identifizieren. Im Idealfall verfügen die ähnlichen Schwingformen auch über ähnliche Abstrahlgrade. Außerdem können möglicherweise anhand ähnlicher Elemente mit besonders hohen oder niedrigen Abstrahlgraden Eigenschaften der Schwingformen identifiziert werden, die z. B. im Entwicklungsprozess genutzt werden können.

In der Regel wird bei der unüberwachten Klassifikation die Anzahl der zu besetzenden Klassen vor dem Klassifikationsprozess festgelegt. Die Identifikation der richtigen Klassenanzahl ist dabei eine komplexe Aufgabenstellung, für die es derzeit keine eindeutige Lösung gibt. Die minimale Klassenanzahl ist  $c_{\min} = 1$ , wobei in diesem Fall eine Klasse alle simulierten Schwingformen enthält. Mit nur einer Klasse können jedoch keine verwertbaren Schlüsse aus der Klassifikationsaufgabe gezogen werden. Bei einer Klassenanzahl von  $c_{\max} = 390$  kann theoretisch jede auftretende Schwingform eine eigene Klasse besetzen, sofern das Klassifikationsverfahren

---

optimal konvergiert. In diesem Fall wären zwar alle Schwingformen eindeutig klassifiziert, mögliche gemeinsame Eigenschaften ähnlicher Schwingformen könnten jedoch nicht mehr extrahiert werden. Die optimale Klassenzahl  $c_{\text{opt}}$  (mit  $c_{\text{min}} \leq c_{\text{opt}} \leq c_{\text{max}}$ ) ist genau so groß, dass alle Schwingformen mit gemeinsamen Eigenschaften in jeweils einer Klasse zusammengefasst werden. Dabei sollten sich die Eigenschaften der Klassen nicht überschneiden und es dürfen keine leeren Klassen existieren.

Ein Ansatz zum Finden einer geeigneten, möglicherweise optimalen, Klassenanzahl  $c$  ist die Durchführung einer Parameterstudie. Dabei wird die Klassenanzahl  $c$  als Parameter variiert und die Klassifikation nach relevanten Größen ausgewertet. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Klassifikationsergebnisse.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Klassenanzahlen  $c = 25$ ,  $c = 36$ ,  $c = 64$ ,  $c = 81$  und  $c = 100$  untersucht und die Klassen anschließend nach der Schalleistung und nach dem Abstrahlgrad ausgewertet. Der unteren Grenze von  $c = 25$  Klassen liegt die Annahme zugrunde, dass es mindestens 15 unterschiedliche Klassen geben muss, da die 15 ersten Eigenschwingformen der untersuchten Struktur ausgewertet werden und diese erwartungsgemäß unterschiedlich ausfallen. Hinzu kommen Schwingformen, die sich aufgrund der Modifikationen von den auftretenden Schwingformen einfach gelagerter Rechteckplatten unterscheiden. Für diese sind dann 10 Klassen als Sicherheit vorgesehen. Der Wahl der oberen Grenze von  $c = 100$  Klassen liegt ein praktischer Sachverhalt zugrunde. Die Klassifikation dient der Ableitung von Regeln. Außerdem liegt die Annahme zugrunde, dass sich ähnliche Schwingformen ähnlich verhalten. Würde sich die Klassenanzahl der Anzahl der Schwingformen annähern, würde der Sinn der unüberwachten Klassifikation ad absurdum geführt werden. Man könnte stattdessen alle Schwingformen nach dem Abstrahlgrad sortieren und einen Klassifikator erstellen, der jeder Schwingform eine Klasse zuordnet. Bei  $c = 100$  Klassen wird der Aufwand zur Untersuchung von Merkmalen bezogen auf die Anzahl der Schwingformen auf etwa 25 % reduziert. Da bei der verwendeten SOM ein quadratischer Ansatz zur Erstellung der Neuronen der Wettbewerbschicht verwendet wird, wird die Klassenanzahl  $c$  in der Parameterstudie quadratisch entwickelt und es ergibt sich die obige Verteilung der Klassenanzahl.

Nach der erfolgten Klassifikation muss das Klassifikationsergebnis bewertet werden. Das kann einerseits optisch erfolgen, muss aber insbesondere auch anhand von quantitativ bewertbaren Parametern durchgeführt werden. Die Klassifikationsergebnisse der vorliegenden Arbeit werden nachfolgend anhand von Diagrammen vorgestellt und quantitativ bewertet.

In den Diagrammen auf den nachfolgenden Seiten sind die Klassen als Balken dargestellt, deren Längen jeweils kennzeichnen, in welchem Wertebereich die Objekte der Klassen liegen. Je länger ein Balken ist, desto größer ist folglich die Streuung der enthaltenen Objekte im jeweiligen Wertebereich. Aus dieser Streuung ergeben sich die quantitativen Bewertungsgrößen, um die

Qualität einer Klassifikation zu beurteilen. Als erste Bewertungsgröße wird die Breite einer Klasse  $\Delta K^{(c)}$  verwendet

$$\Delta K^{(c)} = |x_{max}^{(c)} - x_{min}^{(c)}|, \quad (4-16)$$

wobei die Größe  $x_{max}^{(c)}$  den Maximalwert der zu bewertenden Größe  $x$  eines Objektes innerhalb der Klasse  $c$  und die Größe  $x_{min}^{(c)}$  den Minimalwert eines Objektes innerhalb der Klasse  $c$  bezeichnet. Die nachfolgend erörterten Größen Schallleistung und Abstrahlgrad werden dabei jeweils als Pegel angegeben, weshalb auch die Breite als Pegel angegeben wird.

Die Anzahl der Objekte innerhalb einer Klasse  $n^{(c)}$  wird ebenfalls als Bewertungsmaß herangezogen. Um die Streuung einer Größe der Datensätze innerhalb einer Klasse und damit die Qualität der Klasse zu bewerten, eignen sich nach CICHOSZ [129] u. a. die Größen der Statistik, wie der Mittelwert der Klasse  $m_S^{(c)}$ , der Zentralwert oder Median einer Klasse  $m_M^{(c)}$ , die Varianz  $var^{(c)}$  sowie der Variationskoeffizient  $varc^{(c)}$ .

Der Mittelwert der Klasse  $c$  ergibt sich aus der Summe aller Datensätze  $x_i^c$  innerhalb einer Klasse geteilt durch die Anzahl der Datensätze innerhalb einer Klasse  $n^{(c)}$

$$m_S^{(c)} = \frac{1}{n^{(c)}} \sum_{i=1}^{n^{(c)}} x_i^{(c)}. \quad (4-17)$$

Er beschreibt das arithmetische Mittel der Werte der in den Klassen enthaltenen Datensätze.

Der Zentralwert oder Median einer Klasse  $m_M^{(c)}$  ist definiert als der Wert, der die in einer Klasse  $c$  enthaltenen Datensätze genau zur Hälfte aufteilt. Es befinden sich jeweils 50 % der Datensätze unterhalb dieses Wertes und 50 % der Datensätze oberhalb davon.

$$m_M^{(c)} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( x_{\frac{n^{(c)}}{2}}^{(c)} + x_{\frac{n^{(c)}}{2}+1}^{(c)} \right) & \text{für gerade } n^{(c)} \\ x_{\frac{n^{(c)}+1}{2}}^{(c)} & \text{für ungerade } n^{(c)} \end{cases} \quad (4-18)$$

Im Gegensatz zum Mittelwert ist der Median robust gegenüber Ausreißern und erlaubt gemeinsam mit dem Mittelwert eine Beurteilung über die Position der Klasse im zugrunde gelegten Datenbereich.

Die Varianz  $var^{(c)}$  einer Klasse errechnet sich im Fall der vorliegenden Klassen, die diskrete Daten enthalten, nach [129] anhand der Vorschrift

$$var^{(c)} = \frac{1}{n^{(c)} - 1} \sum_{i=1}^{n^{(c)}} (x_i^{(c)} - m_S^{(c)})^2. \quad (4-19)$$

---

Sie gibt Auskunft darüber, wie stark die in einer Klasse vorkommenden Daten tatsächlich verteilt sind. In diesem Zusammenhang wird auch die empirische Standardabweichung

$$\Sigma = \sqrt{\text{var}^{(c)}} \quad (4-20)$$

angegeben, da sie im Gegensatz zur Varianz im Wertebereich der zu beurteilenden Größen liegt.

Aus dem Mittelwert und der Varianz ergibt sich der Variationskoeffizient

$$\text{varc}^{(c)} = \frac{\text{var}^{(c)}}{m_s^{(c)}}. \quad (4-21)$$

Dieser ist ebenfalls ein Maß für die Streuung der Objekte einer Klasse, im Gegensatz zu Standardabweichung und Varianz aber vorzeichenbehaftet und auf den Mittelwert normiert. Um die Güte einer Klassifikation in Summe über alle Klassen bewerten zu können, können die zuvor beschriebenen Größen jeweils im Mittel betrachtet werden. CICHOSZ [129] gibt weitere beim Data-Mining verwendbare Bewertungsmaße an, diese erhöhen im Kontext dieser Arbeit den Erkenntnisgewinn jedoch nicht.

Wie oben beschrieben erfolgt die Untersuchung anhand vier unterschiedlicher Klassenanzahlen  $c$ . Dabei erfolgt die Klassifikation mit KNN, die als SOM vorliegen, sowie mit dem  $k$ -Means-Algorithmus nach LLOYD [172]. Die Ergebnisse werden nachfolgend in der Reihenfolge nach steigenden Klassenanzahlen und getrennt nach den Klassifikationsverfahren beschrieben. Zuerst werden die Klassifikationsergebnisse, die unter Anwendung der SOM erzeugt wurden, beschrieben. Die Ergebnisse der Klassifikation mittels des  $k$ -Means-Algorithmus werden anschließend dargestellt. Die Auswertung erfolgt sowohl nach der Schallleistung als auch nach dem Abstrahlgrad.

Im Fall der unüberwachten Klassifikation mit  $c = 25$  Klassen, die unter Anwendung von KNN erzeugt wurden, werden alle Klassen mit mindestens einem Objekt aufgefüllt. Das bedeutet, dass die Klassenanzahl nicht zu groß gewählt ist oder aber, dass der Klassifikator  $C$  weder überangepasst noch unterangepasst ist. Abbildung 4-7 stellt die Klassen anhand der Schallleistung dar, weshalb die Klassen in der Abbildung als *Schallleistungsklassen* bezeichnet werden. Diese Nomenklatur wird im weiteren Verlauf der Arbeit fortgesetzt. Daher werden die Klassenauswertungen der Abstrahlgrade nachfolgend als *Abstrahlgradklassen* bezeichnet. Es ist erkennbar, dass nahezu alle Klassen eine gewisse Streuung aufweisen.



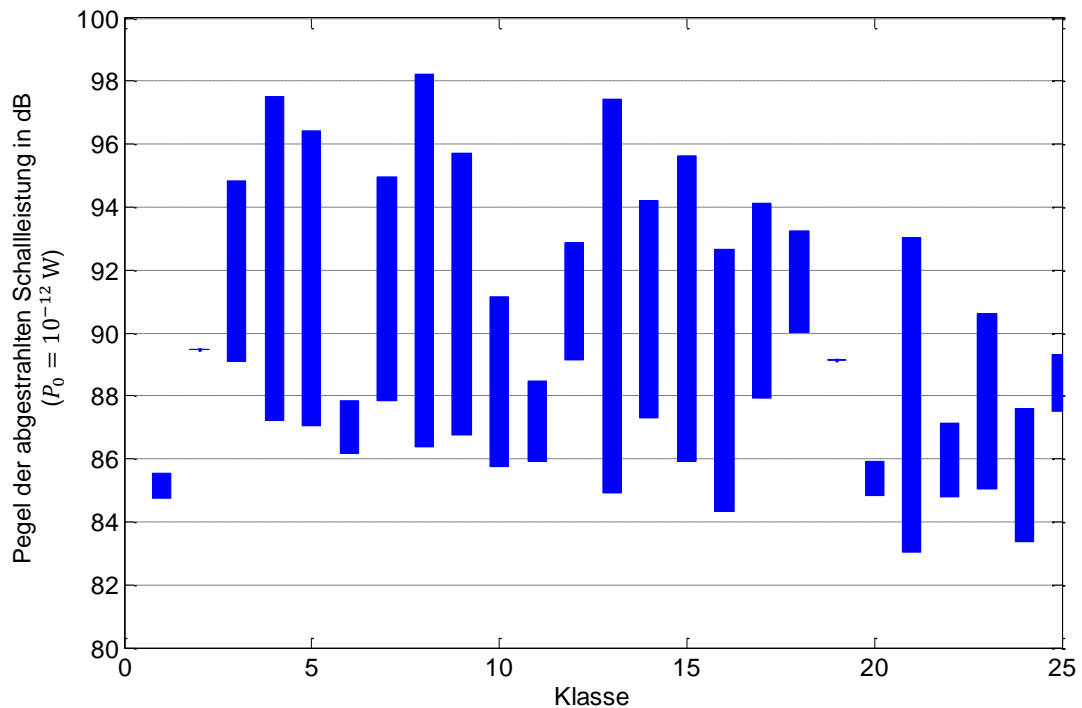


Abbildung 4-7: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Schalleistungsklassen

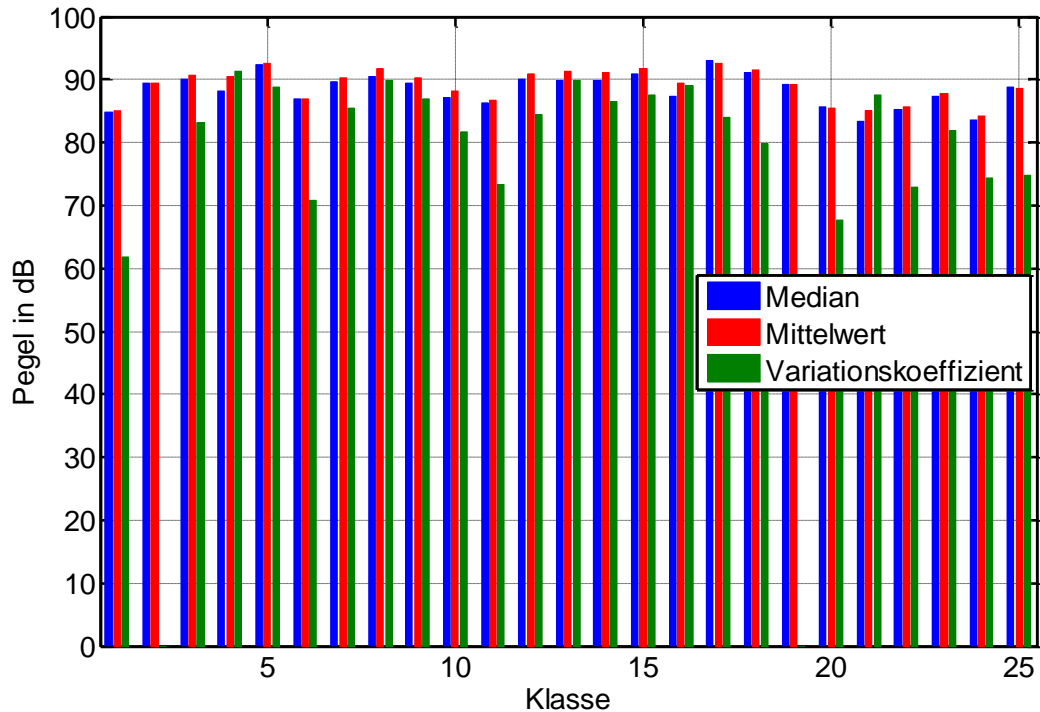


Abbildung 4-8: Mittelwerte, Zentralwerte und Variationskoeffizienten der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Schalleistungsklassen. Als Referenzwert für die Pegelbildung wird bei allen drei dargestellten Größen eine Bezugsleistung von  $P_0 = 10^{-12}$  W verwendet.



Zwecks Visualisierung und um die Streuung zu quantifizieren, sind in Abbildung 4-8 die Mittel- und Zentralwerte sowie die Variationskoeffizienten der Schallleistungsklassen in Pegeln dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse erlauben zunächst keine direkte Bewertung der Güte der Klassifikation, sondern geben lediglich Aufschluss über die Streuung innerhalb der Klassen.

Visualisiert man die Breite der Klassen, wie in Abbildung 4-9, wird deutlich, dass die Klassenbreite als quantitative Größe zur Bewertung greifbarer ist.

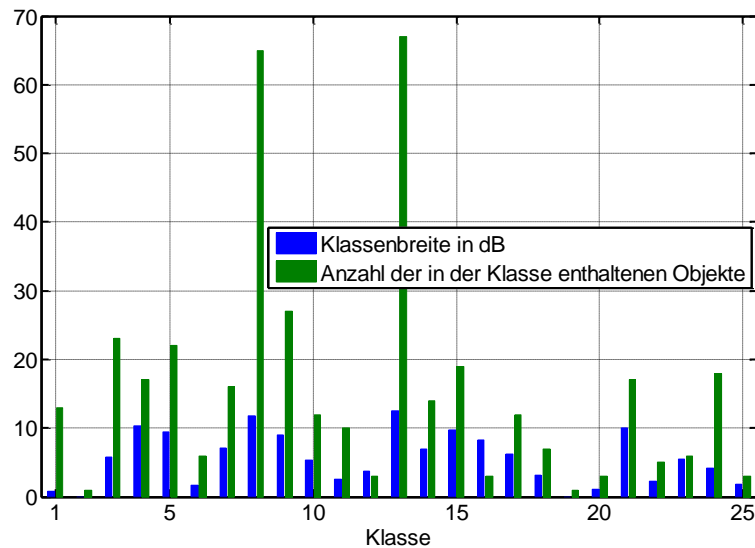


Abbildung 4-9: Breite der Klassen und Anzahl enthaltener Objekte der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Schallleistungsklassen

Die Anzahl der in den Klassen enthaltenen Objekte hat vorwiegend informativen Charakter. Die Klassenbreite  $\Delta K$  hingegen gibt eine direkte Information darüber, ob die Klasse zu Prognose- oder Bewertungszwecken geeignet ist oder nicht. Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen der größten Ausprägung eines Merkmals und der kleinsten Ausprägung eines Merkmals innerhalb einer Klasse  $K$

$$\Delta K = |\max(K) - \min(K)|. \quad (4-22)$$

Umso breiter eine Klasse ist, desto weniger wertvoll ist sie, da die enthaltenen Informationen stark streuen. Im vorliegenden Fall der in Abbildung 4-7 dargestellten Schallleistungsklassen liegt die durchschnittliche Klassenbreite bei ca.  $\overline{\Delta K_P} = 7,1$  dB.

Die Ergebnisse erlauben weitere Interpretationen. Je weniger Objekte einer Klasse zugeordnet werden, desto eindeutiger ausgeprägt sind die den Objekten zugeordneten Schnellefelder. Eine visuelle Überprüfung der breiten Klassen, die besonders viele Objekte enthalten, bestätigt die Annahme, dass in diesen Fällen primär Schnellefelder identifiziert werden, die keine markante Ausprägung aufweisen und sich untereinander deutlich unterscheiden. Diese Aussage soll anhand zweier Klassen exemplarisch verdeutlicht werden.

Klasse  $K^{(1)}$  der in Abbildung 4-9 dargestellten unüberwachten Klassifikation hat eine Breite von  $\Delta K^{(1)} = 0,8$  dB und enthält  $n^{(1)} = 13$  Objekte. Klasse  $K^{(13)}$  hat hingegen eine Breite von  $\Delta K^{(13)} = 12,5$  dB und enthält  $n^{(13)} = 68$  Objekte. Bestimmt man die Ähnlichkeit der Vektoren, die die Schnellefelder repräsentieren, wird deutlich, dass die Vektoren der Klasse  $K^{(13)}$  sich stärker unterscheiden als diejenigen, die sich in der Klasse  $K^{(1)}$  befinden. Zur Bewertung der Ähnlichkeit werden in Anlehnung an [176] nachfolgend die Kosinus-Ähnlichkeit sowie das häufig zum Vergleich von Eigenschwingformen [177] verwendete *Modal Assurance Criterion* (MAC) verwendet. Die Kosinus-Ähnlichkeit  $simK$  zweier Vektoren  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{y}$  entspricht dabei dem Kosinus des Winkels zwischen den beiden Vektoren

$$simK(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\mathbf{x}_i)^2 \sum_{i=1}^n (\mathbf{y}_i)^2}} \quad (4-23)$$

und kann folglich Werte zwischen  $-1$  und  $1$  annehmen.

Das MAC

$$MAC(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{|\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{y}_i^*|^2}{\sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^* \sum_{i=1}^n \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^*} \quad (4-24)$$

ist ein Korrelationsmaß zur Quantifizierung der Ähnlichkeit von Vektoren und nimmt Werte zwischen  $0$  und  $1$  an.<sup>20</sup>

Eine Auswertung der beiden oben erwähnten Klassen verdeutlicht, dass sich die Schnellefelder der Objekte breiter Klassen stärker unterscheiden als diejenigen Schnellefelder weniger breiter Klassen. Wertet man Klasse  $K^{(1)}$  der in Abbildung 4-9 dargestellten Klassifikation aus, so zeigt sich, dass die Kosinus-Ähnlichkeit der Vektoren untereinander im Fall der schlechtesten Übereinstimmung einen Wert von  $simK = 0,9845$  annimmt. Wird anstelle der Kosinus-Ähnlichkeit das *MAC* verwendet, zeigt sich ein vergleichbares Ergebnis. Im Fall der schlechtesten Übereinstimmung nimmt das Kriterium einen Wert von  $MAC = 0,9692$  an. Die Ähnlichkeiten der Schnellevektoren der Klasse  $K^{(1)}$  sind in Abbildung 4-10 dargestellt.

<sup>20</sup> Üblicherweise dient das MAC der Überprüfung der Ähnlichkeit von Eigenvektoren, beispielsweise um die Übereinstimmung von Mess- und Simulationsergebnissen zu bewerten. Daher entspricht die Verwendung im obigen Kontext nicht der in der Literatur vorgegebenen Herangehensweise. Insbesondere werden im Rahmen dieser Arbeit nicht alle Vektoren miteinander verglichen, sondern es wird der erste in einer Klasse enthaltene Vektor als Referenz verwendet und dessen Ähnlichkeit zu den anderen enthaltenen Vektoren überprüft.

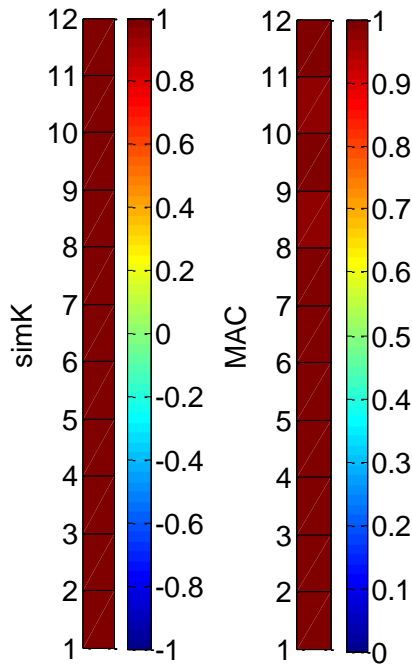


Abbildung 4-10: Kosinus-Ähnlichkeit und MAC der Klasse  $K^{(1)}$  der in Abbildung 4-9 dargestellten Klassifikation

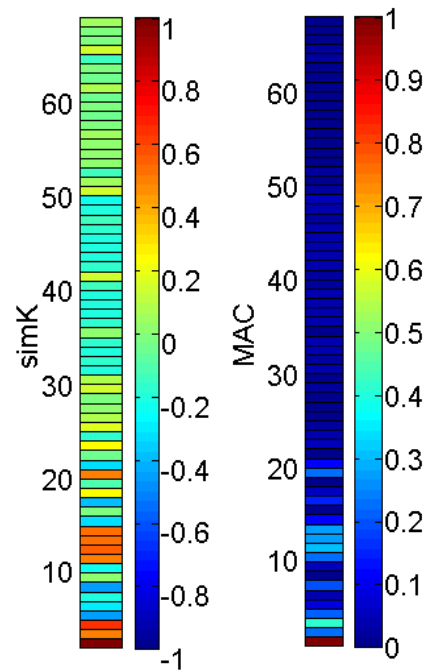


Abbildung 4-11: Kosinus-Ähnlichkeit und MAC der Klasse  $K^{(13)}$  der in Abbildung 4-9 dargestellten Klassifikation

Eine Auswertung von Klasse  $K^{(13)}$ , die in Abbildung 4-11 dargestellt ist, zeigt hingegen ein anderes Ergebnis. Die Klasse enthält Objekte, deren Kosinus-Ähnlichkeit im schlechtesten Fall einen Wert von  $simK = -0,4575$  aufweisen. Das bedeutet, dass es praktisch keine Übereinstimmung gibt. Erfolgt die Bewertung anhand des MAC, ergibt sich für das Objekt mit der geringsten Übereinstimmung zum Referenzvektor ein Wert von  $MAC = 8,1267 \cdot 10^{-12}$ . Dieser Wert nahe 0 verdeutlicht, dass es keine Übereinstimmung mit dem Referenzvektor gibt. Als Referenzvektor wird jeweils der erste in einer Klasse enthaltene Vektor verwendet, der das Schnellefeld des jeweiligen Objektes beschreibt. Die Auswahl des ersten Vektors als alleinige Referenz erfolgt, weil dieser auch die erste klassifizierte Schwingform darstellt, an der sich die weiteren Klassifikationen orientieren.

Die Klassenbreite ist folglich nicht nur ein Maß für die Streuung der Eigenschaften der Objekte innerhalb der jeweiligen Klasse, sondern deutet auch darauf hin, dass die enthaltenen Schnellefelder eine inhomogene Ausprägung aufweisen.

Die Klassenbreite variiert jedoch in Abhängigkeit von den betrachteten Eigenschaften der enthaltenen Objekte. Wertet man die Objekte im Fall der unüberwachten Klassifikation mit  $c = 25$  Klassen anstatt nach dem Pegel der Schallleistung  $P$ , was zu einer durchschnittlichen Klassenbreite von  $\overline{\Delta K_P} = 7,1$  dB führt, nach den Pegeln der Abstrahlgrade  $\sigma$  aus, erhält man eine durchschnittliche Klassenbreite von  $\overline{\Delta K_\sigma} = 8,7$  dB (siehe Abbildung 4-12).

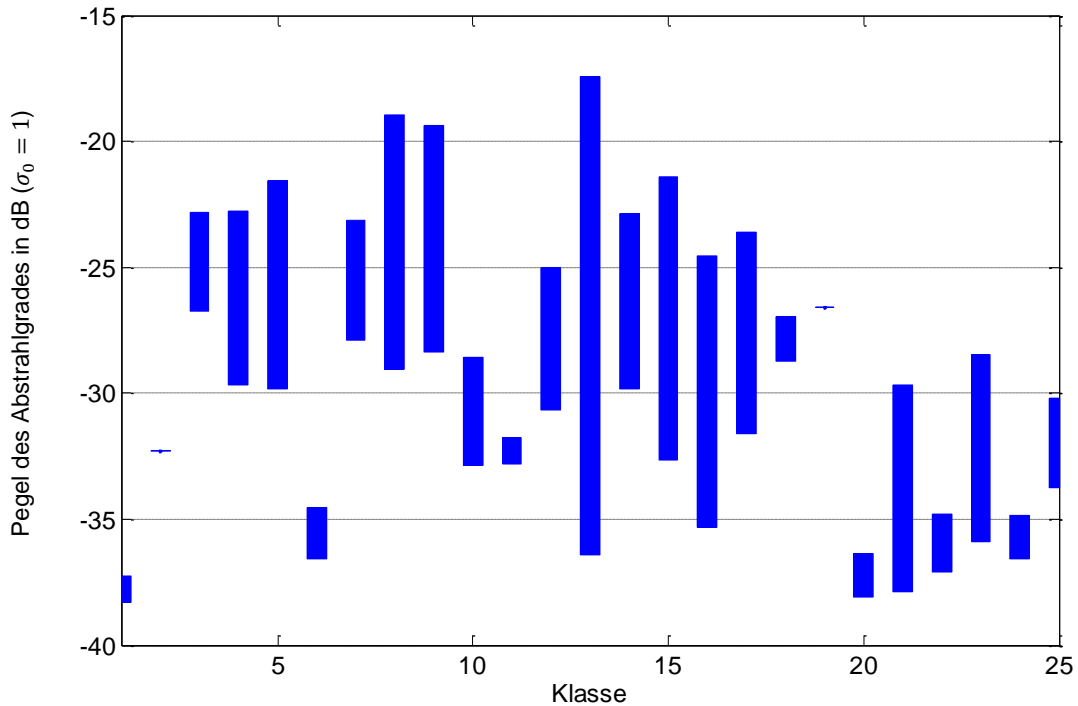


Abbildung 4-12: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Abstrahlgradklassen

Unabhängig von der durchschnittlichen Klassenbreite ist aber auch die Anzahl von Klassen mit einer geringen Klassenbreite im Verhältnis zu den Klassen mit einer hohen Klassenbreite entscheidend. Dieser Sachverhalt zeigt sich, wenn man die Klassen nach dem Abstrahlgrad  $\sigma$  auswertet und darstellt (Abbildung 4-12). Wählt man eine Klassenbreite von maximal 5 dB<sup>21</sup>, um eine Klasse als Klasse mit geringer Breite zu charakterisieren, findet man bei einer Auswertung der Klassen nach der Schallleistung 11 Klassen geringer Klassenbreite, bei einer Auswertung nach dem Abstrahlgrad sind es hingegen 13 Klassen. Das ist insbesondere deshalb interessant, da die Pegel der Abstrahlgrade über einen Wertebereich mit einem Umfang von ca. 20,9 dB verteilt sind und die Schallleistungspegel lediglich auf einen Wertebereich mit einem Umfang von ca. 15,2 dB verteilt sind. Inwiefern sich die bisherigen Ergebnisse verändern, wenn man die Anzahl der Klassen erhöht, wird im Folgenden erörtert.

Erfolgt die unüberwachte Klassifikation mit  $c = 36$  Klassen unter Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen, werden ebenfalls alle Klassen mit mindestens einem Objekt aufgefüllt. Auch in diesem Fall ist die Klassenanzahl also nicht zu groß gewählt und der Klassifikator  $C$  ist offenbar gut angepasst. Die meisten Schallleistungsklassen streuen im Falle von  $c = 36$  zugrunde gelegten Klassen deutlich. Gegenüber den Ergebnissen im Falle von  $c = 25$  zugrunde gelegten Klassen steigt die Anzahl der Klassen mit einer Klassenbreite von maximal 5 dB jedoch auf 19 an. Wertet man die Abstrahlgradklassen aus, so streuen auch diese. Die Anzahl der Klassen mit

<sup>21</sup> Zur Wahl von 5 dB als Obergrenze der Klassenbreite von Klassen, die als Klassen *geringer Klassenbreite* bezeichnet werden, finden sich erläuternde Erklärungen in Abschnitt 4.4.3.

---

einer Klassenbreite von maximal 5 dB liegt bei 20. Die durchschnittliche Klassenbreite der Schallleistungsklassen liegt im Fall von  $c = 36$  bei  $\overline{\Delta K_p} = 6,1$  dB und die durchschnittliche Klassenbreite der Abstrahlgradklassen nimmt einen Wert von  $\overline{\Delta K_\sigma} = 6,1$  dB an. Die Ergebnisse sind in Anhang A abgebildet.<sup>22</sup>

Anders als bei den ersten beiden unüberwachten Klassifikationen unter Anwendung von KNN werden für  $c = 64$  nicht mehr alle Klassen mit mindestens einem Objekt aufgefüllt. Es werden lediglich 58 der 64 Klassen mit Daten besetzt. Dies deutet darauf hin, dass der Klassifikator im Verlauf der Klassifikation nicht ausreichend angepasst wurde. Die durchschnittliche Klassenbreite der Schallleistungsklassen liegt im Fall von  $c = 64$  bei  $\overline{\Delta K_p} = 4,7$  dB und die durchschnittliche Klassenbreite der Abstrahlgradklassen nimmt einen Wert von  $\overline{\Delta K_\sigma} = 3,8$  dB an. Damit ist die Güte der Klassen gegenüber den Klassen für  $c = 25$  und  $c = 36$  höher. Dennoch streuen auch in diesem Fall die meisten Klassen. Wertet man die Klassen nach dem Abstrahlgrad aus, haben 44 Klassen eine Klassenbreite von weniger als 5 dB. Die Schallleistungsklassen enthalten 41 Klassen mit einer Klassenbreite kleiner als 5 dB. Auch die Klassifikationsergebnisse für  $c = 64$  sind im Anhang abgebildet.<sup>23</sup>

Erhöht man die Klassenzahl weiter auf  $c = 81$ , werden nicht mehr alle Klassen mit mindestens einem Objekt aufgefüllt. Von den zur Verfügung stehenden 81 Klassen werden lediglich 66 verwendet. Zwar erhöht sich die Anzahl der Klassen mit einer geringen Klassenbreite im Falle der Auswertung nach der Schallleistung auf 47 und bei der Auswertung nach dem Abstrahlgrad auf 51, dafür steigt die durchschnittliche Klassenbreite der Abstrahlgradklassen aber wieder auf  $\overline{\Delta K_\sigma} = 6,2$  dB. Die durchschnittliche Klassenbreite der Schallleistungsklassen sinkt gegenüber dem Fall  $c = 81$  auf  $\overline{\Delta K_p} = 4,2$  dB. Die Abbildungen der Klassen finden sich ebenfalls im Anhang.<sup>24</sup>

Der Sachverhalt, dass mit steigender verfügbarer Klassenanzahl nicht alle Klassen verwendet werden, setzt sich für  $c = 100$  fort. Es werden lediglich 91 der verfügbaren 100 Klassen verwendet.

Wie aus Abbildung 4-13 ersichtlich ist, ist die durchschnittliche Klassenbreite der Schallleistungsklassen im Vergleich zu den Auswertungen mit einer geringeren Klassenzahl am kleinsten. Die durchschnittliche Klassenbreite liegt bei lediglich  $\overline{\Delta K_p} = 3,0$  dB. Dennoch existieren auch für  $c = 100$  etliche Klassen, die stark streuen und somit nicht für die Prognose von Schallleistung oder Abstrahlgrad geeignet sind.

---

<sup>22</sup> Abbildung A-2 zeigt die Schallleistungsklassen und Abbildung A-3 die Abstrahlgradklassen für  $c = 36$ .

<sup>23</sup> Abbildung A-4 zeigt die Schallleistungsklassen und Abbildung A-5 die Abstrahlgradklassen für  $c = 64$ .

<sup>24</sup> Abbildung A-6 zeigt die Schallleistungsklassen und Abbildung A-7 die Abstrahlgradklassen für  $c = 81$ .

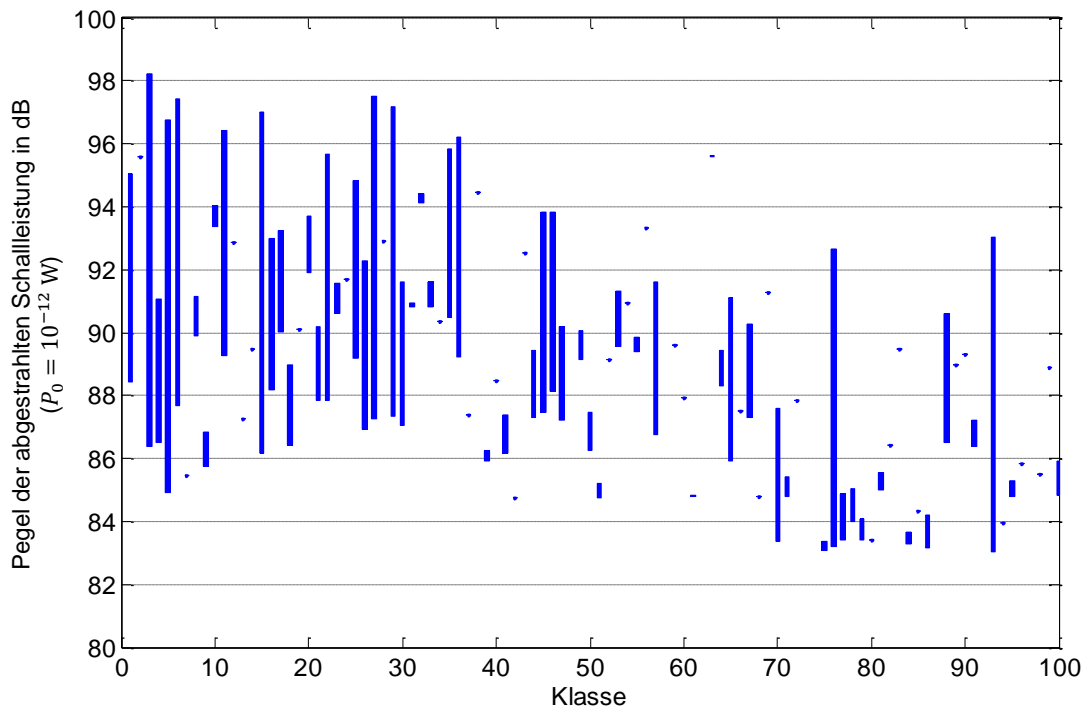


Abbildung 4-13: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 100 möglichen Schallleistungsklassen

Eine Auswertung der Abstrahlgradklassen führt zu einer durchschnittliche Klassenbreite von  $\overline{\Delta K_\sigma} = 3,4$  dB. In Abbildung 4-14 sind die Abstrahlgradklassen dargestellt.

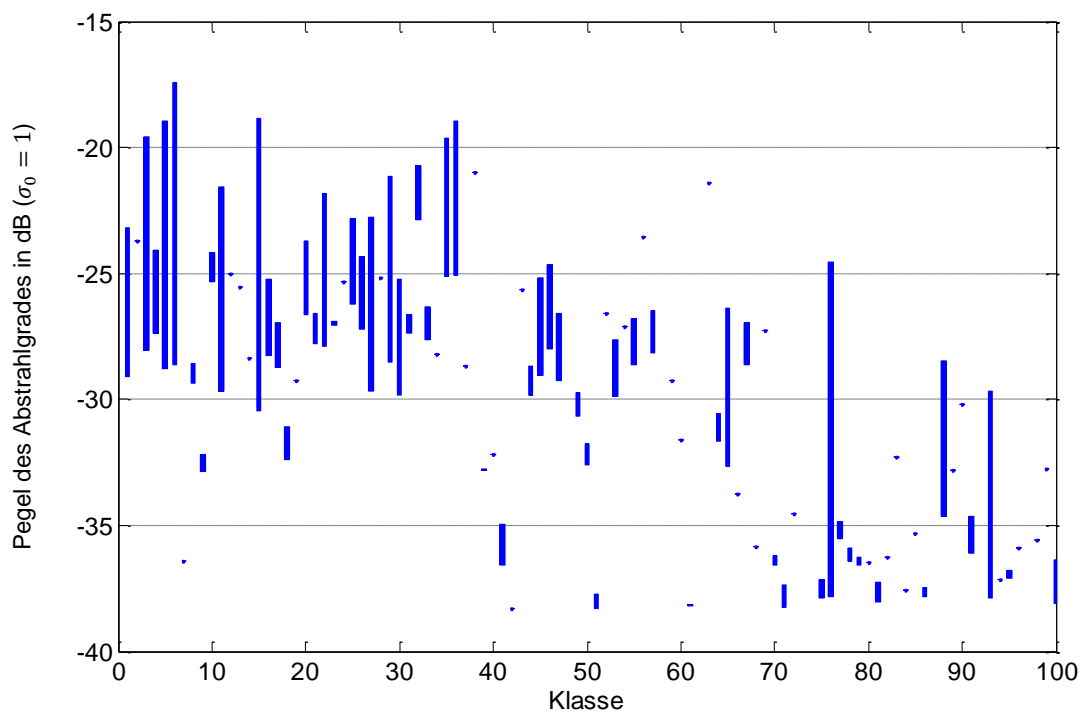


Abbildung 4-14: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 100 möglichen Abstrahlgradklassen

Die wesentlichen Ergebnisse der unüberwachten Klassifikation der Schnellefelder mittels KNN in Form von SOM sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die jeweils besten Ergebnisse, bezogen auf das Beurteilungsmaß in der äußerst linken Tabellenspalte, sind fett markiert.

Tabelle 4-1: Beurteilungsmaße der unüberwachten Klassifikationen der Schnellefelder mit einer SOM

| Klassenanzahl $c$                             | $c = 25$ |          | $c = 36$ |             | $c = 64$ |             | $c = 81$    |             | $c = 100$   |             |
|---|----------|----------|----------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   | $P$      | $\sigma$ | $P$      | $\sigma$    | $P$      | $\sigma$    | $P$         | $\sigma$    | $P$         | $\sigma$    |
| unbesetzte Klassen                            | 0        |          | 0        |             | 6        |             | 15          |             | 9           |             |
| Klassen geringer Klassenbreite*               | 11       | 13       | 19       | 20          | 41       | 45          | 47          | 51          | <b>60</b>   | <b>66</b>   |
| Anteile Klassen m. geringer Breite in %       | 44       | 52       | 52,8     | 55,6        | 70,7     | <b>77,6</b> | <b>71,2</b> | 77,3        | 65,9        | 72,5        |
| mittlere Klassenbreite in dB                  | 7,14     | 8,68     | 6,07     | 6,10        | 4,74     | 3,83        | 4,21        | 6,21        | <b>3,04</b> | <b>3,42</b> |
| mittlere Standardabweichung $\bar{\sigma}$ ** | 0,43     | 0,87     | 1,17     | 0,50        | 0,37     | 0,71        | <b>0,33</b> | 0,62        | <b>0,30</b> | 0,62        |
| mittlerer Variationskoeffizient***            | 0,34     | 0,63     | 0,79     | <b>0,35</b> | 0,24     | 0,44        | 0,21        | <b>0,35</b> | <b>0,20</b> | 0,39        |

\* Als Klasse mit geringer Klassenbreite gelten Klassen mit  $\Delta K \leq 5$  dB (siehe Abschnitt 4.4.3).  
 \*\* Einheit für  $P$  in  $10^{-3}$  W und für  $\sigma$  dimensionslos in  $10^{-3}$   
 \*\*\* in  $10^{-3}$

Die Klassifikation mit der höchsten Güte ist, die Bewertungsmaße aus Tabelle 4-1 zugrunde gelegt, diejenige mit  $c = 100$  Klassen, da die Klassen die geringsten mittleren Klassenbreiten aufweisen. Ein derartiges Ergebnis entspricht auch den Erwartungen, da man bei einer steigenden Klassenanzahl davon ausgehen kann, dass die mittlere Klassenbreite sinkt. Interessant ist hingegen die Tatsache, dass der Anteil der Klassen mit einer geringen Klassenbreite nicht in dem Maße ansteigt, wie die Anzahl der Klassen selbst. So liegen die Anteile für  $c = 25$  und  $c = 36$  bereits in einem Bereich um ca. 50 %. Im Maximum liegen die Anteile der Klassen mit einer geringen Klassenbreite bei unter 80 %. Dieses Maximum wird allerdings nicht mit der höchsten Klassenanzahl von  $c = 100$  erreicht und liegt für den Abstrahlgrad bei  $c = 64$  und für die Schallleistung bei  $c = 81$ .

Weiterhin ist es nicht möglich, eine eindeutige Bewertung dahingehend vorzunehmen, ob die Verwendung von Abstrahlgradklassen oder Schallleistungsklassen eine höhere Prognosesicherheit liefert. Tendenziell sinkt die mittlere Klassenbreite der Schallleistungsklassen mit steigender Klassenzahl. Die mittlere Klassenbreite der Abstrahlgradklassen sinkt ebenfalls, der Trend schwankt aber im Vergleich zu den Schallleistungsklassen.

Die wesentlichen Ergebnisse der unüberwachten Klassifikation mit dem  $k$ -Means-Algorithmus unterscheiden sich von denen der KNN-Klassifikation mittels SOM nicht. Für niedrige Klassenzahlen streuen die Schallleistungen und Abstrahlgrade der in den Klassen enthaltenen Objekte stark. Legt man eine größere Klassenanzahl zugrunde, wird die mittlere Klassenbreite geringer.

Abbildung 4-15 zeigt die Schallleistungsklassen für  $c = 25$ . Die mittlere Klassenbreite liegt bei  $\overline{\Delta K_P} = 7,1$  dB und alle Klassen sind mit Objekten besetzt. Dabei haben 11 der 25 Klassen eine Klassenbreite von weniger als 5 dB.

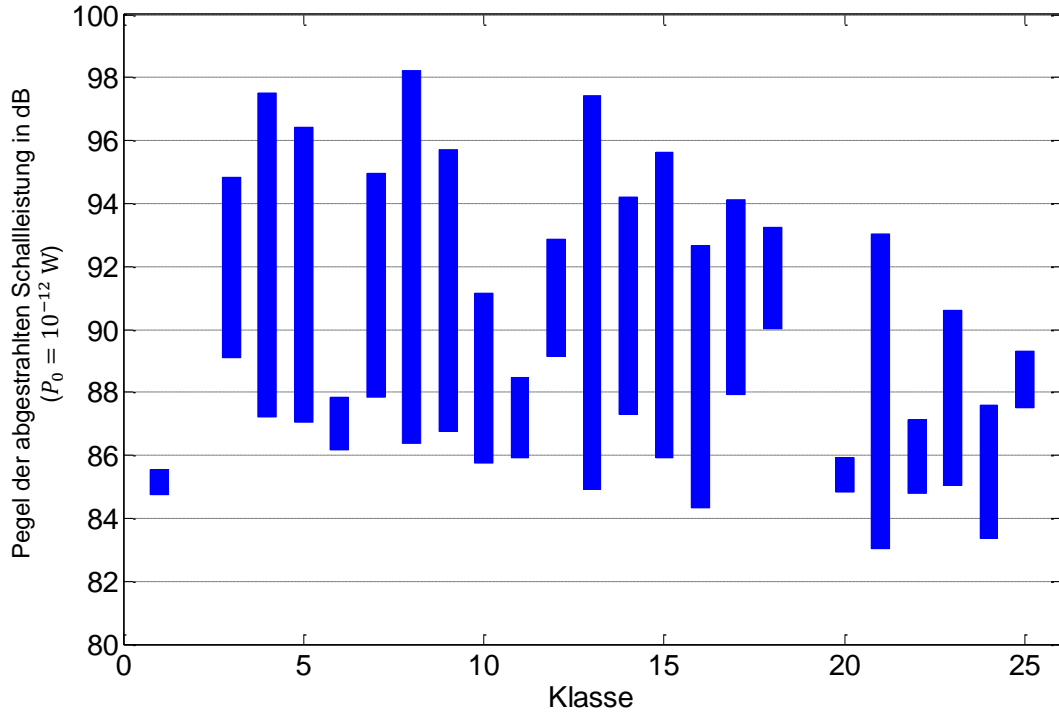


Abbildung 4-15: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Schallleistungsklassen

Wertet man für  $c = 25$  die Abstrahlgradklassen aus, liegt die mittlere Klassenbreite bei  $\overline{\Delta K_\sigma} = 8,6$  dB und 13 von 25 Klassen haben eine Klassenbreite von weniger als 5 dB. Die Abstrahlgradklassen sind in Abbildung 4-16 auf der folgenden Seite dargestellt.

Mit steigender Klassenzahl  $c$  sinken die mittleren Klassenbreiten. Dabei ist für  $c = 36$  bis  $c = 81$  jeweils die mittlere Klassenbreite der Schallleistungsklassen  $\overline{\Delta K_P}$  geringer als die der Abstrahlgradklassen  $\overline{\Delta K_\sigma}$ . Die Klassifikationsergebnisse für die Klassenzahlen  $c = 36$ ,  $c = 64$  und  $c = 81$  sind im Anhang zu finden (siehe Abbildung A-8 bis Abbildung A-13).

Für  $c = 100$  ist die mittlere Klassenbreite, wie auch im Fall der unüberwachten Klassifikation mit KNN mittels SOM, sowohl für die Schallleistungsklassen als auch für die Abstrahlgradklassen am niedrigsten. Auch bei Verwendung des  $k$ -Means-Algorithmus werden nicht alle 100 Klassen verwendet, sondern lediglich 92 Klassen mit Objekten besetzt. Die mittlere Klassenbreite der Schallleistungsklassen liegt bei  $\overline{\Delta K_P} = 3,3$  dB.



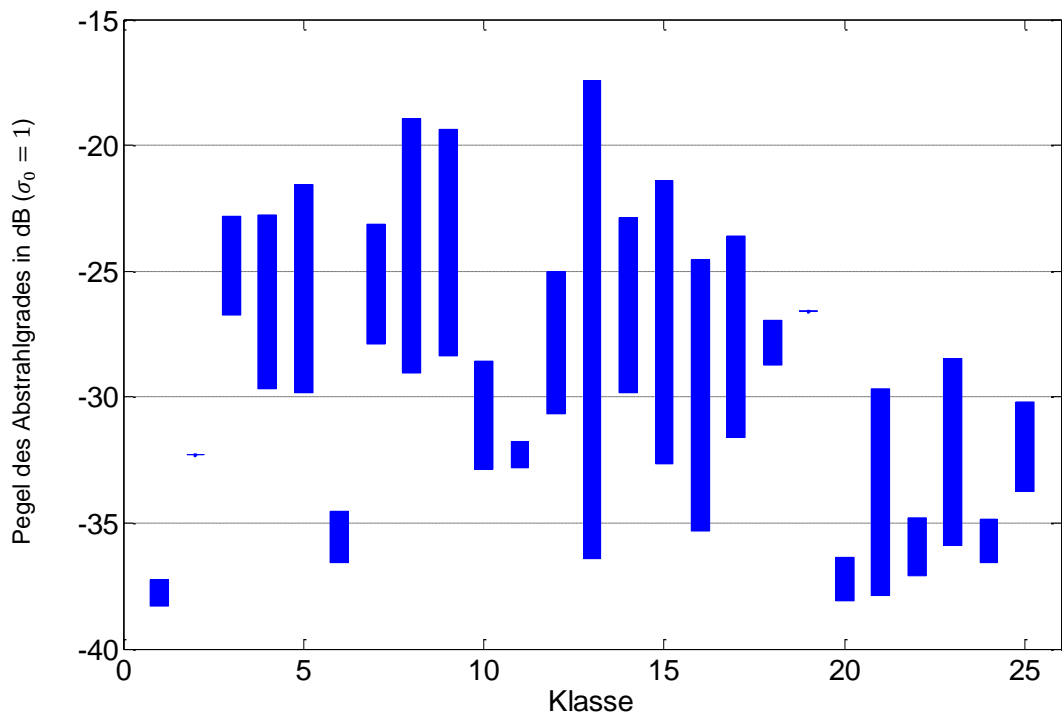


Abbildung 4-16: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 25 möglichen Abstrahlgradklassen

Wie in Abbildung 4-17 erkennbar, sind mehrere Klassen sehr schmal. Sie bestehen in nahezu allen Fällen nur aus einem einzigen Objekt. Die mittlere Klassenbreite der Schallleistungsklassen liegt bei  $\overline{\Delta K_\sigma} = 2,8$  dB.

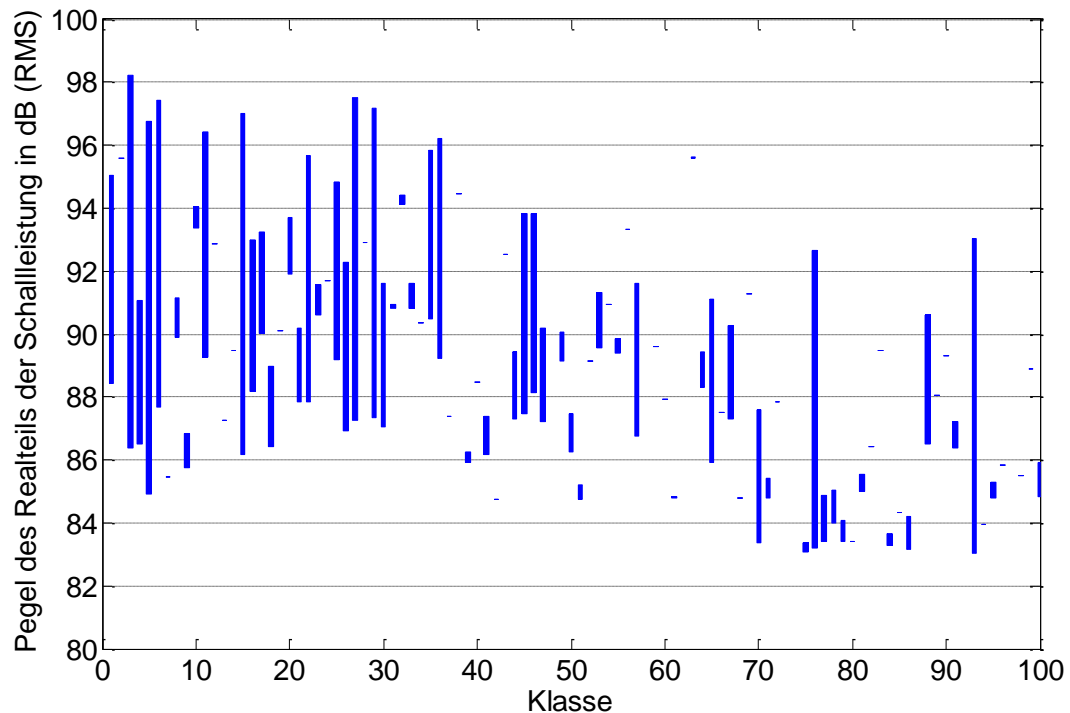


Abbildung 4-17: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 100 möglichen Schallleistungsklassen

Wie in Abbildung 4-18 erkennbar, werden insbesondere niedrige Abstrahlgradklassen klassifiziert. Von den 92 verfügbaren Klassen weisen 77 eine Klassenbreite von weniger als 5 dB auf.

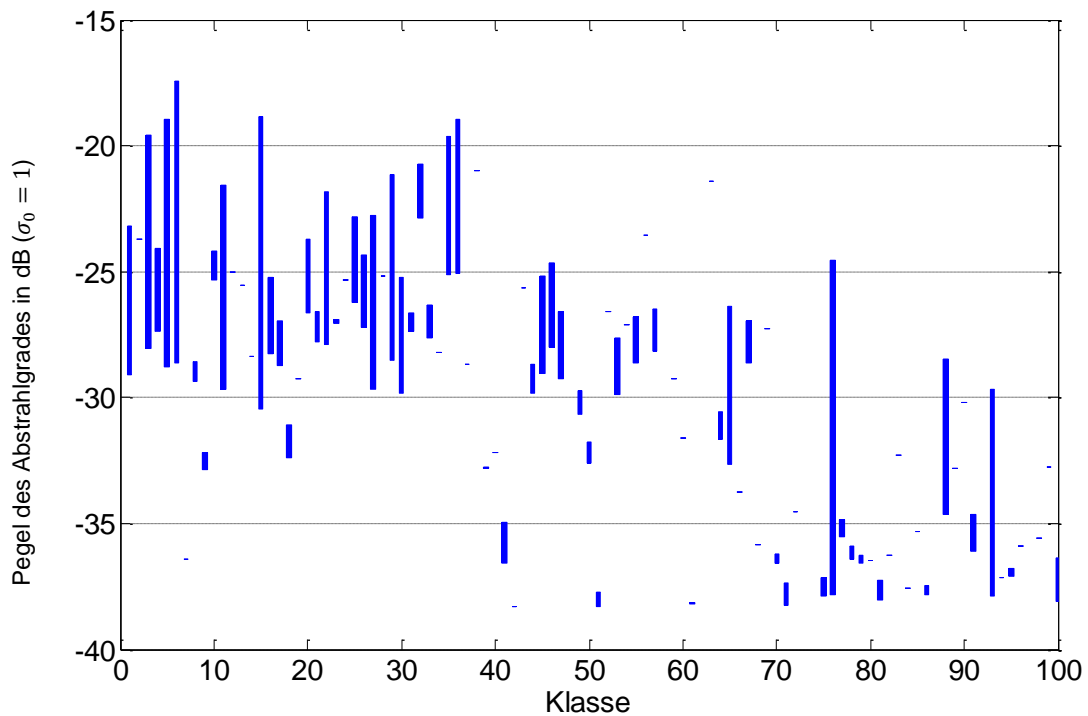


Abbildung 4-18: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 100 möglichen Abstrahlgradklassen

Eine Zusammenstellung der Eigenschaften aller Klassifikationen, die mit dem  $k$ -Means-Algorithmus durchgeführt wurden, findet sich in Tabelle 4-2. Die jeweils besten Ergebnisse einer Eigenschaft sind fett gekennzeichnet.

Tabelle 4-2: Beurteilungsmaße der unüberwachten Klassifikationen der Schnellefelder mit  $k$ -Means-Algorithmus

| Klassenanzahl $c$                               | $c = 25$ |          | $c = 36$ |          | $c = 64$ |          | $c = 81$ |          | $c = 100$   |             |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
|   | $P$      | $\sigma$ | $P$      | $\sigma$ | $P$      | $\sigma$ | $P$      | $\sigma$ | $P$         | $\sigma$    |
| unbesetzte Klassen                              | 0        |          | 0        |          | 6        |          | 0        |          | 8           |             |
| Klassen geringer Klassenbreite*                 | 11       | 13       | 18       | 18       | 29       | 28       | 57       | 63       | <b>74</b>   | <b>77</b>   |
| Anteile Klassen m. geringer Breite in %         | 44       | 52       | 50       | 50       | 50       | 48,3     | 70,4     | 77,8     | <b>80,4</b> | <b>83,7</b> |
| mittlere Klassenbreite in dB                    | 7,07     | 8,64     | 6,60     | 7,24     | 7,08     | 10,32    | 4,36     | 4,66     | <b>3,31</b> | <b>2,83</b> |
| mittlere Standardabweichung $\bar{\Sigma}^{**}$ | 0,50     | 0,89     | 0,53     | 1,03     | 0,58     | 1,43     | 0,42     | 0,88     | <b>0,26</b> | <b>0,28</b> |
| mittlerer Variationskoeffizient***              | 0,34     | 0,65     | 0,36     | 0,67     | 0,46     | 1,18     | 0,28     | 0,52     | <b>0,18</b> | <b>0,16</b> |

\* Als Klasse mit geringer Klassenbreite gelten Klassen mit  $\Delta K \leq 5$  dB (siehe Abschnitt 4.4.3).

\*\* Einheit für  $P$  in  $10^{-3}$  W und für  $\sigma$  dimensionslos in  $10^{-3}$

\*\*\* in  $10^{-3}$

---

Vergleicht man die Ergebnisse der unterschiedlichen Klassifikationsverfahren, lassen sich mehrere Sachverhalte feststellen. Die Klassenbreiten unterscheiden sich bei beiden Verfahren für die jeweiligen Klassenzahlen nicht wesentlich. Lediglich für  $c = 64$  fällt auf, dass die KNN-Klassifikation zu Klassen mit einer geringeren Klassenbreite führt als die Klassifikation mit dem  $k$ -Means-Algorithmus. Im Fall der Klassifikation mit  $c = 100$  Klassen schneidet die Klassifikation mit dem  $k$ -Means-Algorithmus besser ab als die KNN-Klassifikation.

Es kann daher keine prinzipielle Empfehlung gegeben werden, welches Klassifikationsverfahren für praktische Anwendungsfälle gewählt werden soll. Die KNN-Klassifikation dauert erheblich länger und benötigt mehr Rechenkapazität, dafür kann das entstehende KNN anschließend als Klassifikator verwendet werden. Die Klassifikation mittels  $k$ -Means-Algorithmus erfolgt sehr viel schneller und ist weniger rechenintensiv. Dafür müssen die klassifizierten Datensätze, sofern sie genutzt werden sollen, anschließend in Klassifikatoren überführt werden. Als Klassifikator eignen sich wiederum KNN oder aber SVM. Dabei ist die Ableitung von KNN-Klassifikatoren wieder mit zeitaufwändigen und ressourcenintensiven Berechnungen verbunden und sowohl KNN als auch SVM benötigen viele Datensätze, um einen Klassifikator zu trainieren. Es kommt also auf die Ausgangssituation, die technischen Rahmenbedingungen und die spätere Anwendung an, welche Klassifikationsverfahren eingesetzt werden sollen. In der Praxis sollte man, sofern die nötige Rechenkapazität vorliegt, von Anfang an mit KNN arbeiten, da hier die Gesamtheit der zu klassifizierenden Datensätze dem Trainingsdatensatz entspricht.

Versuche, die auf Basis des  $k$ -Means-Algorithmus mit  $c = 100$  Klassen generierten Klassen mit KNN in Klassifikatoren zu überführen, führten erwartungsgemäß zu unbefriedigenden Ergebnissen, da die Menge an Trainingsdaten zu gering ausfällt.

---

#### **4.4 Musterevaluation und Merkmalsextraktion sowie deren Anwendung**

---

Wesentliches Ziel beim Data-Mining ist das Finden von Mustern und das Ableiten von Regeln. Ein Ansatz ist die Untersuchung der Elemente von Klassen auf gemeinsame Merkmale. Die betragsmäßige Charakterisierung von Leistungs- und Leistungswurzelgrößen ist ein erster Schritt, der bereits im Rahmen des Prozessschrittes, der in Abschnitt 4.3 beschrieben wird, vorgenommen wurde. Daher soll in einem nächsten Schritt die geometrische Ausprägung der Felder erschlossen werden. Dies kann auf zwei Weisen erfolgen. Die erste Möglichkeit ist die Bewertung der Gewichtsvektoren der SOM. Die zweite Möglichkeit ist die Superposition der in einer Klasse enthaltenen Schnellefelder, wobei die Superposition sowohl additiv als auch multiplikativ erfolgen kann. Anschließend können die entstehenden Vektoren – auch visuell – beurteilt werden.

#### 4.4.1 Interpretation von Gewichtsvektoren beim Einsatz von KNN

Im Anschluss an eine unüberwachte Klassifikation (Clustering) mit einer SOM können die Gewichtsvektoren  $\omega_j$  (siehe Abschnitt 3.5.2) zur Analyse der Klassen herangezogen werden, wie in Abbildung 4-19 verdeutlicht.

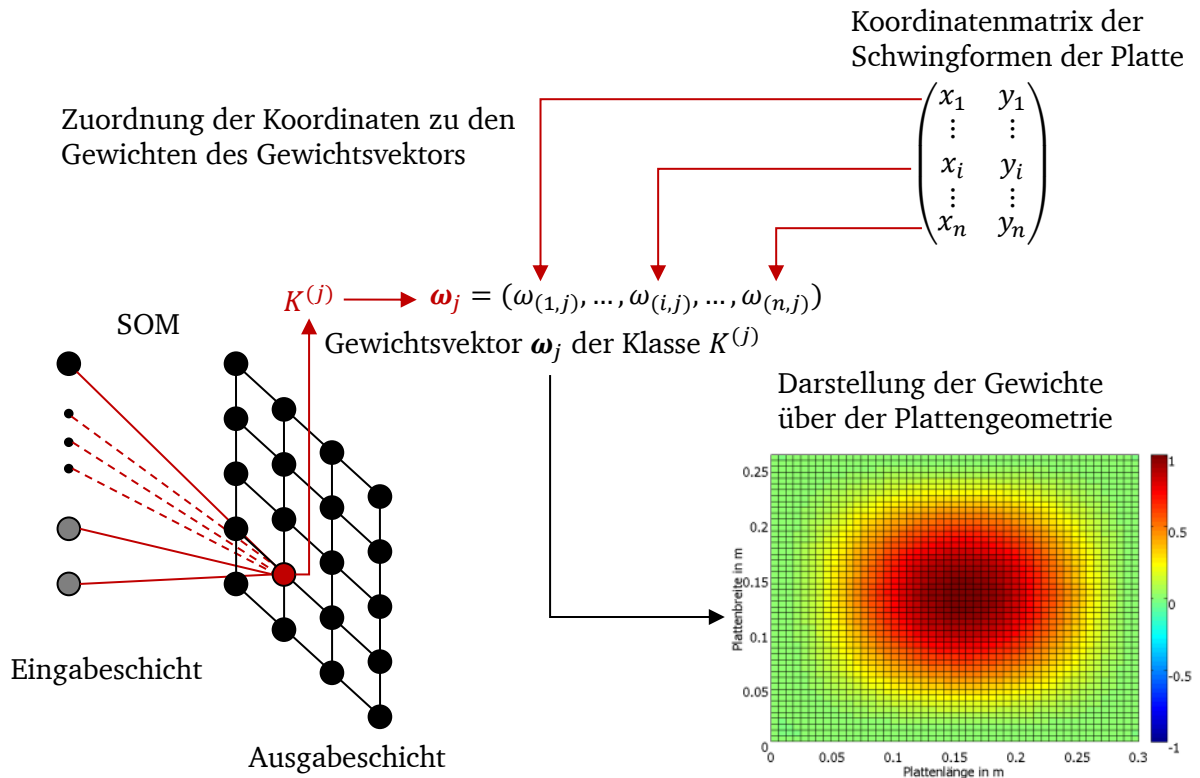


Abbildung 4-19: Mapping von Gewichtsvektoren einer SOM auf die Geometrie der Plattenstruktur

Die Gewichtsvektoren repräsentieren, bei einem Mapping der SOM-Gewichte auf die Plattenkoordinaten, ein Abbild der zu erkennenden Schwingformen. Dazu wird jedem  $i$ -ten Eintrag des Gewichtsvektors  $\omega_j$  die Position auf der Platte zugewiesen, die der  $i$ -ten Koordinate der ursprünglich als Eingabevektoren verwendeten Schwingformvektoren entspricht.

Mittels des oben beschriebenen Vorgehens kann automatisierbar zu jeder von der SOM belegten Klasse eine typische, diese Klasse repräsentierende Schwingform abgeleitet werden. Damit wird die abstrakte Information, die die SOM als Klassifikator nutzt, visuell zugänglich und für den Anwender auch manuell interpretierbar gemacht.

Visualisiert man den Gewichtsvektor der Klasse  $K^{(1)}$  als Geometrie-Mapping, erhält man eine Darstellung, die sich praktisch nicht von der Darstellung der ersten Eigenschwingform einer Rechteckplatte unterscheidet. Das Geometrie-Mapping des Gewichtsvektors ist in Abbildung 4-20 dargestellt.

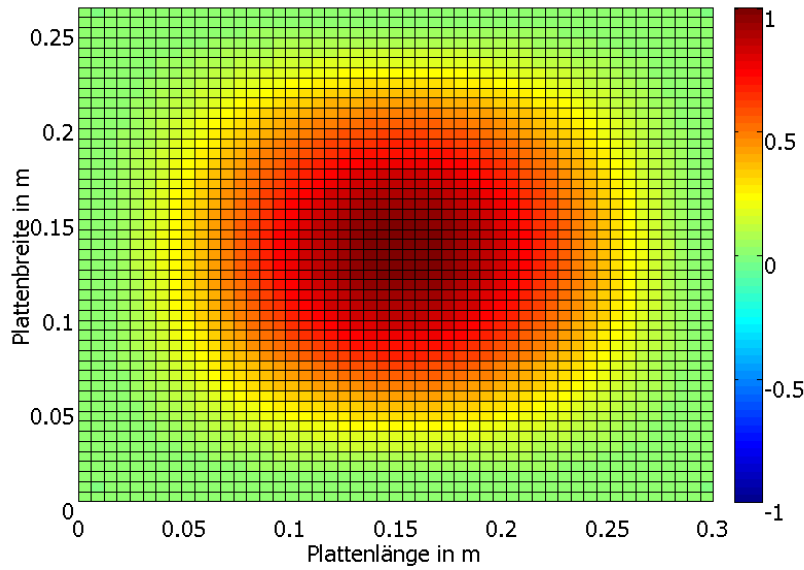


Abbildung 4-20: Geometrie-Mapping des Gewichtsvektors der Klasse  $K^{(1)}$

Bei der Visualisierung der Gewichtsvektoren als Geometrie-Mapping sind die Gewichtsvektoren  $\omega_j$  jeweils auf ihr Maximum  $\max((\omega_{(1,j)}, \dots, \omega_{(i,j)}, \dots, \omega_{(n,j)}))$  normiert, um eine bestmögliche Ausprägung der geometrischen Eigenschaften zu erreichen. Die normierten Gewichte  $\omega_{(i,j)}^*$  nehmen damit Werte im Intervall  $-1 \leq \omega_{(i,j)}^* \leq 1$  an.

Befinden sich in einer Klasse, z. B. aufgrund einer schlecht konditionierten SOM, Schwingformen, die eine unterschiedliche geometrische Ausprägung aufweisen, dann repräsentiert das Mapping des Gewichtsvektors nicht eine typische Schwingform der Klasse. In diesem Fall handelt es sich um eine Art Mittelwert aus den Schwingformen der Klasse. Eine Interpretation der Eigenschaften enthaltener Schwingformen ist dann nicht mehr möglich. Voraussetzung für eine Interpretation der Gewichtsvektoren ist demzufolge eine scharfe Trennung der unterschiedlich ausgeprägten Schwingformen in unterschiedliche Klassen. Vor einer Anwendung ist also die Ähnlichkeit der in einer Klasse vorkommenden Schwingformen manuell zu bewerten. Dieser Schritt kann z. B. mit den in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Ähnlichkeitsmaßen erfolgen. Im Rahmen der Arbeit wurde mit dem MAC sowie der Kosinus-Ähnlichkeit gearbeitet.

#### 4.4.2 Additive und multiplikative Superposition von Schwingformen einer Klasse

Zwei vom Klassifikationsverfahren unabhängige Interpretationsansätze für die Eigenschaften einer Klasse sind die additive und die multiplikative Superposition der enthaltenen Schwingformen. Auf diese Weise können bestimmte Merkmale der Schwingformen verstärkt werden.

Bei der additiven Superposition werden die Vektoren der Schnellefelder aller in einer Klasse enthaltenen Schwingformen addiert. Sind in der Klasse  $K^{(j)}$   $k$  Schnellefeldvektoren  $\mathbf{v}_i^{(j)}$  enthalten, ergibt sich der Vektor der additiven Superposition aller Schnellefelder  $\mathbf{v}^{(j)+}$

$$\mathbf{v}^{(j)+} = \sum_{i=1}^k \mathbf{v}_i^{(j)}. \quad (4-25)$$

Liegen z. B. bei allen enthaltenen Schnellefeldern Schwingungsbäuche an einer bestimmten Stelle oder in einem bestimmten Bereich, wird dies durch die Superposition verdeutlicht. Ähneln sich die Schwingformen, die sich innerhalb einer Klasse befinden, nicht, entstehen durch die Überlagerung jedoch Vektoren ohne belastbare Aussagekraft. Aus diesem Grund ist eine Bewertung der Ähnlichkeit der in einer Klasse enthaltenen Vektoren notwendig. Wie im vorherigen Abschnitt auch beschrieben, eignen sich hierfür die in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Ähnlichkeitsmaße.

Bei der multiplikativen Superposition, die insbesondere auf dem Gebiet der (visuellen) Datenanalyse als Interpretationsansatz genutzt wird [178], werden die  $k$  Schnellefeldvektoren  $\mathbf{v}_i^{(j)}$  der Klasse  $K^{(j)}$  komponentenweise miteinander multipliziert. Liegt der Schnellefeldvektor  $\mathbf{v}_i^{(j)}$  vor

$$\mathbf{v}^{(j)} = (v_1^{(j)}, \dots, v_i^{(j)}, \dots, v_n^{(j)}), \quad (4-26)$$

ergibt sich die  $i$ -te Komponente des Vektors der multiplikativen Superposition  $\mathbf{v}^{(j)*}$  zu

$$v_i^{(j)*} = \prod_{i=1}^n v_i^{(j)}. \quad (4-27)$$

Die multiplikative Superposition führt dazu, dass die Einträge des resultierenden Vektors an den Stellen, deren Komponenten kleine Werte aufweisen, nahezu verschwinden. Folglich nehmen nur die Einträge des Vektors der multiplikativen Superposition  $\mathbf{v}^{(j)*}$  Werte an, die deutlich von 0 abweichen, an denen die in der Klasse enthaltenen Schnellefelder Maxima oder Minima aufweisen.

Sowohl bei der additiven als auch bei der multiplikativen Superposition empfiehlt sich, wie auch bei der Visualisierung der Gewichtsvektoren als Geometrie-Mapping im vorherigen Abschnitt, eine normierte Darstellung. Im Fall der additiven Superposition nehmen die Einträge des Vektors  $\mathbf{v}_i^{(j)+}$  Werte im Intervall  $-1 \leq v_i^{(j)+} \leq 1$  an, wenn die Normierung auf  $\max\left(\left(|v_1^{(j)+}|, \dots, |v_i^{(j)+}|, \dots, |v_n^{(j)+}|\right)\right)$  erfolgt. Wendet man die vergleichbare Normierung auf  $\max\left(\left(|v_1^{(j)*}|, \dots, |v_i^{(j)*}|, \dots, |v_n^{(j)*}|\right)\right)$  auf  $\mathbf{v}_i^{(j)*}$  an, nehmen die Vektoreinträge ebenfalls Werte im Intervall  $-1 \leq v_i^{(j)*} \leq 1$  an. Da im Falle der multiplikativen Superposition das Vorzeichen des Vektoreintrages unter Umständen jedoch von der Anzahl der in der jeweiligen Klasse enthaltenen Vektoren abhängt, ist es empfehlenswert, bei der normierten Darstellung von  $\mathbf{v}_i^{(j)*}$  die

Beträge der Komponenten zu visualisieren. In diesem Fall werden Werte im Intervall  $0 \leq |v_i^{(j)*}| \leq 1$  angenommen.

Abbildung 4-21 zeigt den Unterschied zwischen additiver und multiplikativer Superposition der Schwingformvektoren. In der Darstellung der additiven Superposition ist zu erkennen, dass die Schwingungsbäuche unterschiedliche Vorzeichen haben. Diese Information ist in der Darstellung der multiplikativen Superposition nicht mehr enthalten. Dafür geht aus der Visualisierung der multiplikativen Superposition hervor, welcher Schwingungsbauch in den Schwingformen der Klasse besonders ausgeprägt ist. Mit dieser Information könnte man die multiplikative Superposition der Schwingformen, die in Klassen mit starken Strahlern enthalten sind, auch als eine Art alternativen Beobachtbarkeitsindex für Systeme zur aktiven Lärminderung verwenden.

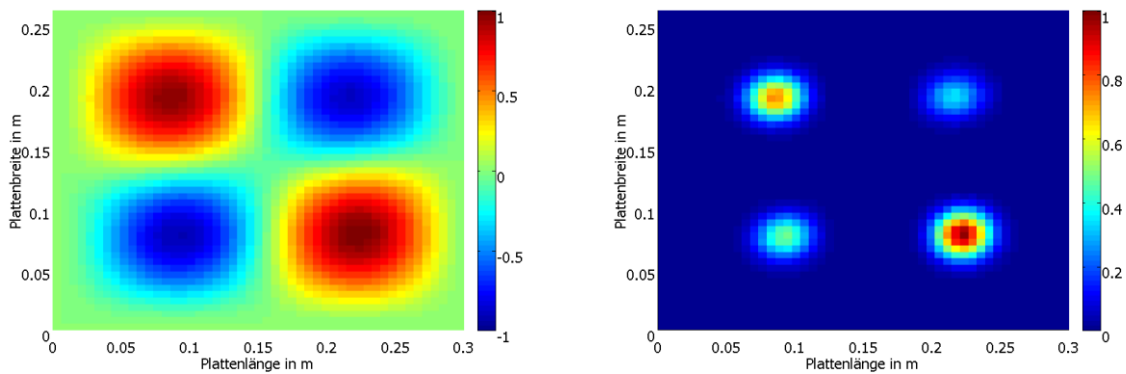


Abbildung 4-21: Additive (links) und multiplikative (rechts) Superposition der Schwingformvektoren einer Klasse

#### 4.4.3 Bewertung und Anwendung

Die in den vorherigen Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 erörterten Analysen erlauben die Ableitung der typischen geometrischen Ausprägungen der enthaltenen Schwingformen. Die Bewertung der identifizierten Klassen erfolgt zunächst rein qualitativ. Dazu werden die generierten Klassen mit Schwingformen in Klassen *starker Strahler*  $K^{\sigma^+}$ , Klassen *schwacher Strahler*  $K^{\sigma^-}$  sowie Klassen mit *unspezifizierbaren Strahlern*  $K^{\sigma^?}$  unterteilt.

Zur Einteilung der Klassen in Klassen mit starken und schwachen Strahlern werden die Quartile der Abstrahlgrade  $\sigma$  der Datensätze herangezogen.<sup>25</sup> Das untere Quartil liegt bei  $Q1 = -29,8$  dB, das mittlere Quartil bei  $Q2 = -27,4$  dB und das obere Quartil bei

<sup>25</sup> Die Grenzen für starke und schwache Strahler sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die erzeugten Datensätze bezogen. Eine Anwendung der Methode auf andere Aufgabenstellungen mit anderen Geometrien führt zu Abstrahlgraden, die von denen der Datensätze des Plattenbeispiels dieser Arbeit abweichen. Der Ansatz, die zugrunde gelegten Daten in Quartile zu unterteilen, bietet sich jedoch auch für andere Anwendungsfälle an. Alternativ können aber auch Grenzen definiert werden, die auf einer konkreten Aufgabenstellung basieren.

$Q3 = -25,1$  dB. Rundet man die Ergebnisse, lassen sich daraus die Grenzen für schwache und starke Strahler ableiten. Als schwache Strahler gelten demnach Strahler, für deren Pegel ihrer Abstrahlgrade  $L_\sigma \leq -30$  dB gilt. Für die Pegel der Abstrahlgrade starker Strahler gilt demnach  $L_\sigma \geq -25$  dB. Klassen schwacher Strahler enthalten demnach ausschließlich Schwingformen mit Abstrahlgraden, deren Pegel  $L_\sigma \leq -30$  dB aufweisen. Klassen starker Strahler enthalten ausschließlich Schwingformen mit Abstrahlgraden, deren Pegel im Bereich  $L_\sigma \geq -25$  dB liegen. Ausgewertet werden dabei ausschließlich Klassen geringer Klassenbreite.

Als Klassen geringer Klassenbreite werden dabei die Klassen definiert, die eine Klassenbreite  $\Delta K$  von  $\Delta K \leq 5$  dB aufweisen. Die Wahl der Grenze von 5 dB erfolgt aufgrund praktischer Überlegungen. Stammen die verwendeten Daten aus Messungen, ist eine wissenschaftlich belastbare Bestimmung von Pegeldifferenzen des Abstrahlgrades von 3 dB ( $\Delta L_\sigma < 3$  dB) eine Herausforderung und nur mit enormem technischem Aufwand möglich. Gleichzeitig bedeuten Pegeldifferenzen des Abstrahlgrades von 5 dB ( $\Delta L_\sigma \geq 5$  dB), dass die Abstrahlgrade der in einer Klasse enthaltenen Schwingformen sich um ein Vielfaches unterscheiden.

Als Klassen mit nicht unspezifizierbaren Strahlern gelten alle anderen Abstrahlgradklassen, insbesondere die, deren Klassenbreiten Werte von  $\Delta K \geq 5$  dB aufweisen.

### ***Geometrische Ausprägung von Schwingformen***

Wertet man die Klassen schwacher Strahler aus, so findet man insbesondere drei Schwingformen, die unter den Nummern 1 bis 3 in Abbildung 4-22 skizziert sind. Darin stellen die Kreise jeweils Schwingungsbäuche dar. Beim Vorkommen mehrerer Schwingungsbäuche ist die Phasenbeziehung zwischen ihnen anhand der in den Kreisen enthaltenen Symbole + und – dargestellt, wobei zwischen + und – jeweils ein Phasenunterschied von  $180^\circ$  besteht. Die Skizze unter Nummer 4 in Abbildung 4-22 stellt eine deformierte Form der Schwingform Nummer 3 dar. Ähnliche Schwingformen und Deformationen der Schwingformen Nummer 1 bis 3 stellen ebenfalls schwache Strahler dar.

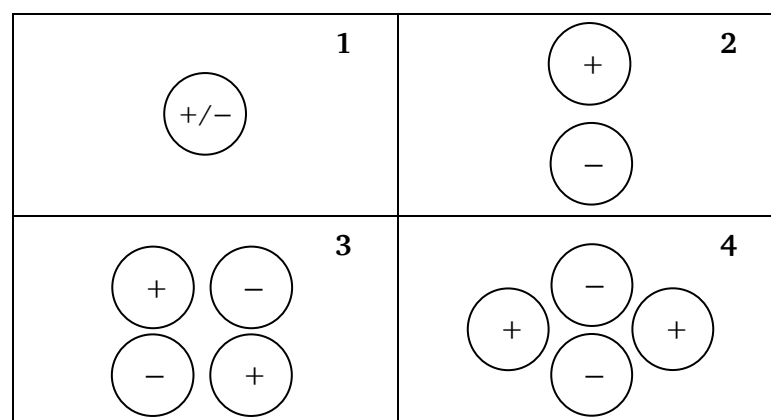


Abbildung 4-22: Typische Schwingformen, die in Klassen schwacher Strahler enthalten sind



Die Analyse bestätigt insbesondere auch die Ergebnisse von CUNEFARE [43], die in Abschnitt 2.1 aufgeführt werden. Diese besagen, dass Schwingformen, die eine gerade Anzahl an Schwingungsbäuchen sowohl über die Länge als auch über die Breite aufweisen, in der Regel schwache Strahler sind.

Wertet man die Klassen starker Strahler aus, finden sich insbesondere die Schwingformen, die in Abbildung 4-23 skizziert sind.

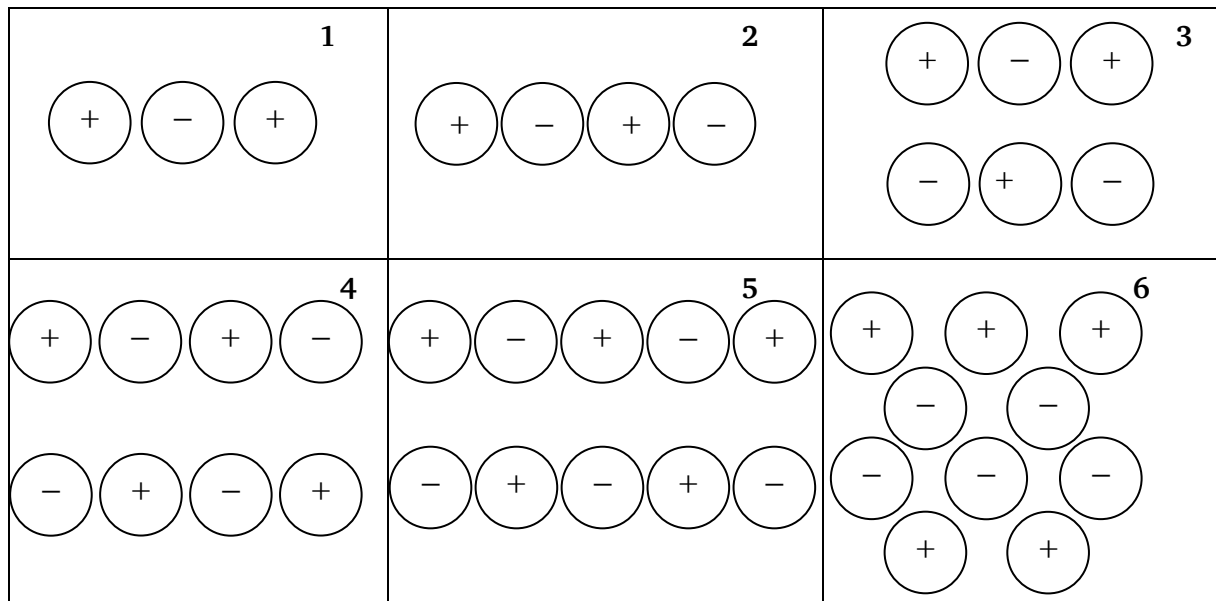


Abbildung 4-23: Typische Schwingformen, die in Klassen starker Strahler enthalten sind

Die in Abbildung 4-22 und in Abbildung 4-23 skizzierten Ergebnisse stellen zunächst keine Erkenntnisse dar, die über den Stand der Forschung hinausgehen. Vielmehr verdeutlichen sie die Nutzarmachung der Schwingforminformationen der normierten additiven und multiplikativen Superposition von Schwingformklassen. Anhand des klassenweisen Gewinnens von Informationen über Schwingungsbäuche können typische Schwingformen, die für die jeweilige Anwendung schwache oder starke Strahler repräsentieren, ingenieurmäßig beschrieben werden. Dadurch kann die abstrakte Information, die in einzelnen Klassen vorliegt, in typische Schwingformen überführt und bei der Bewertung im Entwicklungsprozess verwendet werden.

Außer der Identifikation der Orientierung der Schwingungsbäuche können die geometrischen Formen der Schwingungsbäuche analysiert werden, die zu schwachen oder starken Strahlern führen. So finden sich unter den Schwingformen der modifizierten Rechteckplatte beispielsweise Schwingungsbäuche, die eine nierenförmige Ausprägung aufweisen. Eine genauere Analyse führt jedoch zu der Erkenntnis, dass diese Ausprägung eines Schwingungsbauches im Fall der modifizierten Rechteckplatte keinen einzuordnenden Einfluss auf den Abstrahlgrad hat.

---

### **Anwendung der Schalleistungsklassen**

Unabhängig von der geometrischen Ausprägung typischer Schwingformen von Klassen starker und schwacher Strahler können die Abstrahlgradklassen genutzt werden, um in Verbindung mit der Oberflächenschnelle eines Schnellefeldes eine Schätzung der abgestrahlten Schallleistung vornehmen zu können. Dabei ist jedoch anzumerken, dass eine quantitative Schätzung der abgestrahlten Schallleistung anhand der Schwingformen nicht vollständig möglich ist. Stattdessen erfolgt eine qualitative Bewertung, die Schwingformen zueinander in Relation setzen kann. Basis der Bewertung sind Schnellefelder, die mittels der Abstrahlgradklassen eine Gewichtung erfahren. Auf diese Weise wird die Prognosesicherheit vorhandener Körperschallsamples erhöht.

Ausgangssituation stellt eine Menge Körperschallsamples (Nr. 1 in Abbildung 4-24) dar, die entweder Ergebnisse von numerischen Simulationen oder von messtechnischen Experimenten darstellen. Aus dieser Menge kann ohne eine aufwändige Berechnung der Schallabstrahlung nicht auf die abgestrahlte Schallleistung geschlossen werden. Bewertet man diese Körperschallsamples hinsichtlich ihrer Oberflächenschnelle und gewichtet sie anhand von Abstrahlgradklassen, erhält man drei Mengen von Körperschallsamples, die aus der ursprünglichen Menge hervorgehen. Eine grafische Darstellung dieser drei Teilmengen findet sich unter Nr. 2 und Nr. 3 in Abbildung 4-24.

Die erste Menge sind Körperschallsamples, die in Relation zu den anderen Körperschallsamples eine vergleichsweise hohe mittlere quadratische Oberflächenschnelle besitzen und gleichzeitig in eine Klasse mit hohen Strahlern klassifiziert wird. Diese Körperschallsamples können als *kritische Samples* bewertet werden und würden im Entwicklungsprozess eine konstruktive Maßnahme erfordern, die entweder zu einer geringeren Anregung oder zur Eliminierung der Schwingform führt.

Die zweite Menge sind Körperschallsamples, die in Relation zu den anderen Körperschallsamples eine vergleichsweise niedrige mittlere quadratische Oberflächenschnelle besitzen und gleichzeitig in eine Klasse mit schwachen Strahlern klassifiziert wird. Diese Körperschallsamples können als *unkritische Samples* bewertet werden und würden im Entwicklungsprozess keine konstruktive Maßnahme erfordern.

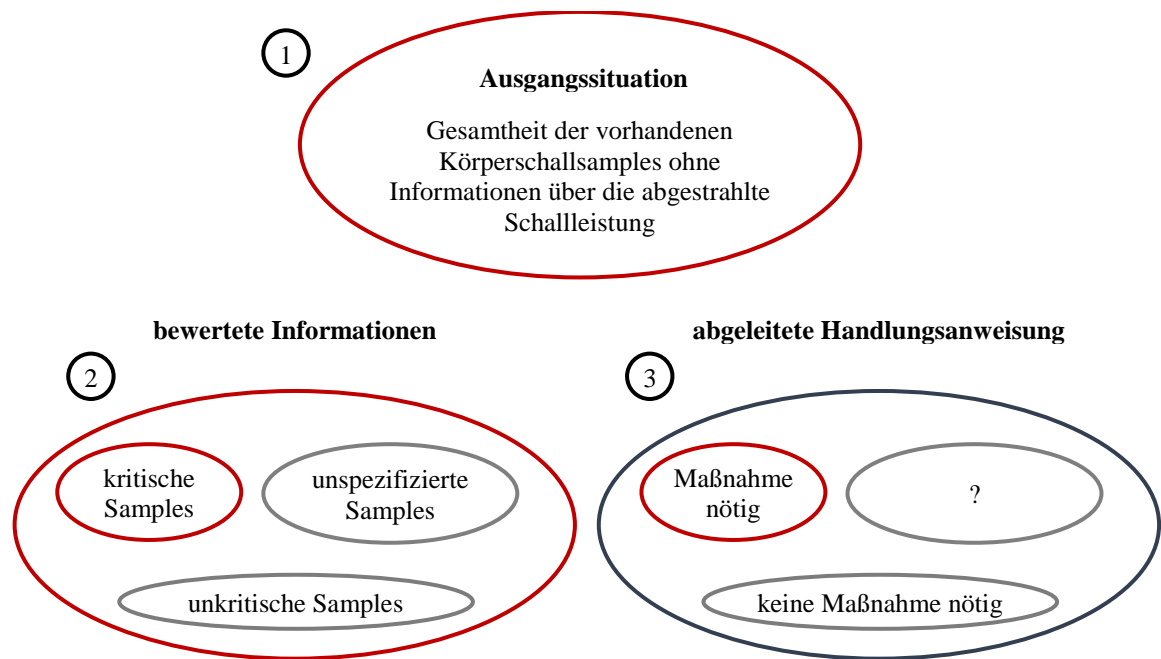


Abbildung 4-24: Mengen bewerteter und unbewerteter Körperschallsamples

Bei der dritten Menge handelt es sich um Körperschallsamples, die sich aus drei Kombinationen aus mittlerer quadratischer Oberflächenschnelle und Abstrahlgradklasse zusammensetzen. Die erste Kombination sind Körperschallsamples, die in Relation zu den anderen Körperschallsamples eine vergleichsweise niedrige mittlere quadratische Oberflächenschnelle besitzen und gleichzeitig in eine Klasse mit schwachen Strahlern klassifiziert wird. Bei der zweiten Kombination handelt es sich um Körperschallsamples, die in Relation zu den anderen Körperschallsamples eine vergleichsweise hohe mittlere quadratische Oberflächenschnelle besitzen und gleichzeitig in eine Klasse mit schwachen Strahlern klassifiziert wird. Die dritte Kombination besteht aus Körperschallsamples, die in Klassen mit *unspezifischen Strahlern* klassifiziert werden. Diese drei möglichen Kombinationen von Körperschallsamples werden als *unspezifizierte Samples* bewertet. Ob im Entwicklungsprozess eine Maßnahme erforderlich wird, kann nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden. Im Sinne einer konservativen Auslegung würden diese Schwingformen konstruktiv sinnvollerweise dahingehend berücksichtigt, dass die Anregung möglichst gering ausfällt oder aber zusätzliche Dämpfung eingebracht wird.

Die oben beschriebene Einteilung lässt sich, wie in Abbildung 4-25, als Entscheidungsbaum darstellen. Dabei dient, wie auch häufig in der industriellen Praxis, die mittlere quadratische Oberflächenschnelle oder die ERP als Bewertungsgrundlage, und die untersuchten Schwingformen werden zusätzlich hinsichtlich ihrer Abstrahlgradklasse bewertet.

Wendet man den in Abbildung 4-25 dargestellten Entscheidungsbaum in der Entwicklung an, erhält man eine qualitative Bewertung der als Schnellefelder vorliegenden Schwingformen. Diese Bewertung ist mit Unsicherheiten behaftet. Mit Hilfe von Mess- und Simulationsergebnissen können diese Unsicherheiten jedoch qualifiziert und die Prognosesicherheit erhöht werden.

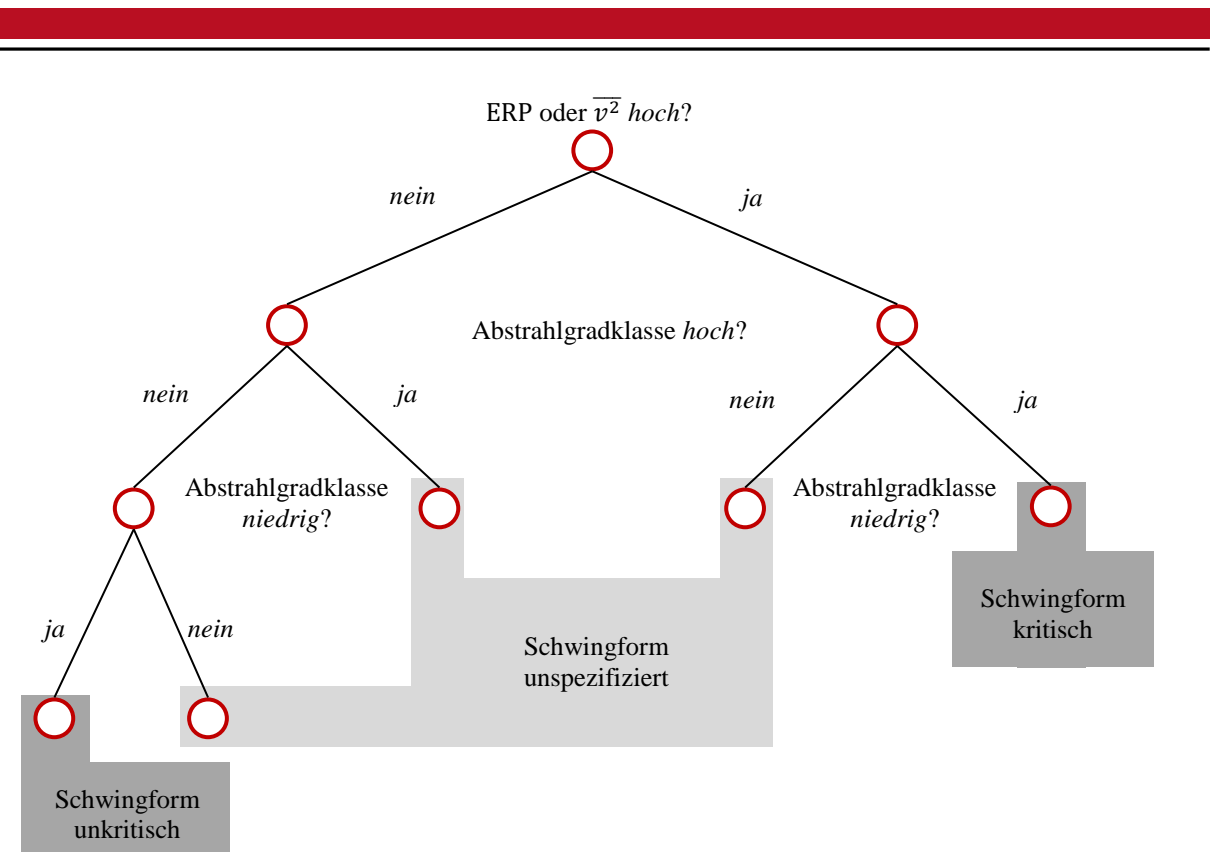


Abbildung 4-25: Entscheidungsbaum zur Bewertung von Schwingformen

Es bietet sich an, die Bewertung von Schnellefeldern regelmäßig mit Validationsdaten abzusichern. Dazu können sowohl Messergebnisse als auch Simulationsdaten verwendet werden, wie in Abbildung 4-26 skizziert.

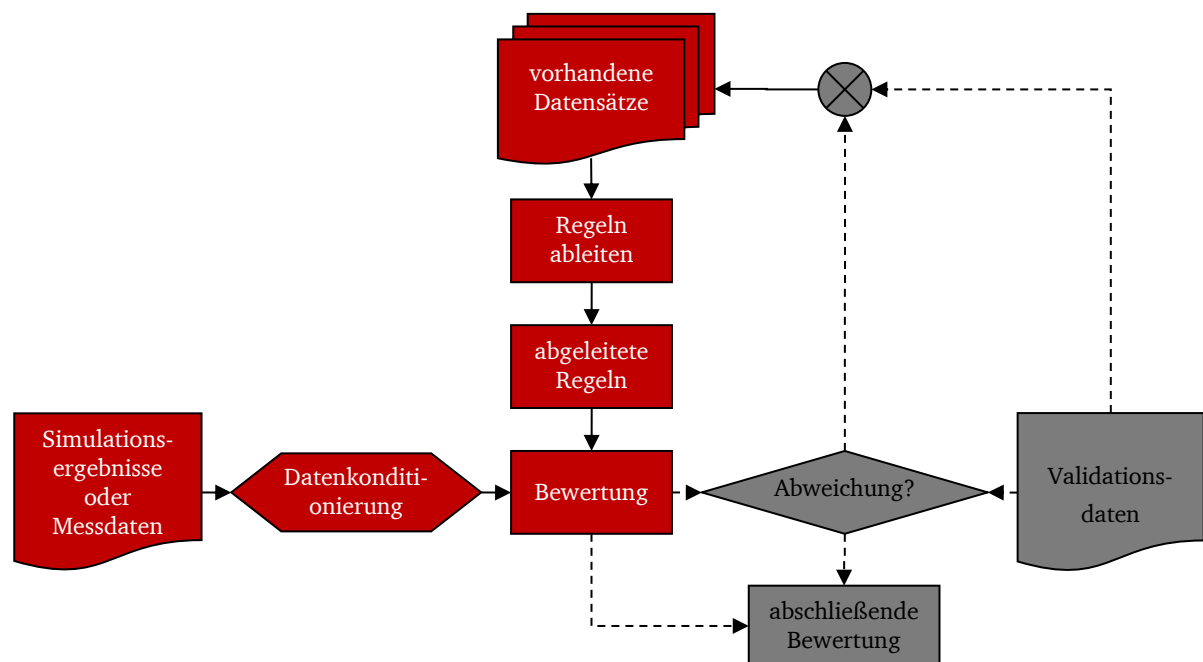


Abbildung 4-26: Ansatz zur Verbesserung der Bewertungsergebnisse

---

Bei der Verbesserung der Bewertungsergebnisse ist es sinnvoll, sämtliche Validationsdaten zu nutzen, um gemeinsam mit den bereits vorhandenen Datensätzen die Regeln zur Bewertung (Klassifikatoren) zu verbessern. Das gesamte Vorgehen umfasst insbesondere auch die in Abschnitt 3 beschriebene Phase *Simulation* des CRISP-DM.

---

#### 4.5 Generalisierung der Ergebnisse

---

Die Ergebnisse der Parameterstudien an der in Abschnitt 4.2.1.1 vorgestellten Plattenstruktur sollten auf Plattenstrukturen anderer Geometrien übertragbar sein. Mit Hilfe von dimensionslosen Maßstabsfaktoren können die Eigenfrequenzen, die Körperschallfunktionen, die Abstrahlgrade und damit die Schallleistungen auf andere Plattengeometrien transformiert werden. Dieser Sachverhalt wurde von WEBER nachgewiesen, der auch zeigen konnte, dass dimensionslose Faktoren als akustische Modellgesetze auch für Plattenstrukturen mit Rippen und Punktmassen sowie weitere Strukturen (z. B. Industriegetriebe) gelten [52, 53]. Demzufolge ist die Annahme gerechtfertigt, dass die Ergebnisse auch auf beliebige Schalenstrukturen übertragbar sind.

Ein Ansatz zur Generalisierung der Ergebnisse, und damit zur Überprüfung der genannten Hypothese, ist das *Mapping* der vorliegenden Daten auf eine generische Hüllgeometrie. Ein ähnliches Vorgehen findet bei numerischen Simulationen Anwendung, wenn Ergebnisse fein vernetzter Strukturgitter auf gröbere Fluidgitter projiziert werden (Mesh Mapping).

Eine Anwendung der Klassifikatoren, die auf Basis der Rechteckplatte auf Schalenstrukturen rechteckiger Grundform mit vergleichsweise geringen Krümmungen im Verhältnis zur projizierten Abmessung gewonnen wurden, ist jedoch mit Sicherheit möglich. Eine Abschätzung des Fehlers, der im Falle einer einfach gekrümmten Schalenstruktur entsteht, kann anhand einer Schallintensitätsbetrachtung durchgeführt werden.

Die abgestrahlte Schallleistung  $P$  einer Struktur ergibt sich durch Integration der Schallintensität  $I$  über die Fläche  $S$ .

$$P = \int I dS \quad (4-28)$$

Vergleicht man die Schallleistung einer ebenen schallabstrahlenden Fläche  $P_e$  mit der Schallleistung einer gekrümmten Strahlerfläche  $P_b$ , können diese folglich aus den Intensitäten  $I_e$  und  $I_b$  durch Integration über die Oberflächen  $S_e$  und  $S_b$  bestimmt werden. Die Differenz zwischen der Schallleistung  $P_b$  und der Schallleistung  $P_e$  quantifiziert den Fehler  $e$ , der sich bei einer Anwendung eines Klassifikators aus Abschnitt 4.3 auf eine Schalenstruktur ergibt

$$e = |P_b - P_e|. \quad (4-29)$$

Der Fehler wird von zwei wesentlichen Faktoren bestimmt: dem Unterschied zwischen den beiden Oberflächen  $S_e$  und  $S_b$  sowie den unterschiedlichen Richtungen, in die die Schallfelder

gerichtet sind, da die Richtungen der Intensitätsvektoren auch von der Krümmung der Oberfläche und dem dadurch anders orientierten Schnellefeld mitbestimmt werden. Der Fehler aufgrund der größeren Oberfläche ist durch die Flächendifferenz direkt quantifizierbar. Der Fehler aufgrund der unterschiedlichen Schallfelder kann durch eine Analogie zur Fehlerabschätzung beim Messen der Schallintensität mittels zweier Druckmikrofone, die im Abstand  $\Delta x$  voneinander angeordnet sind, abgeschätzt werden.<sup>26</sup> Dabei beträgt die den Messfehler quantifizierende Pegeldifferenz zwischen der tatsächlichen Schallintensität  $L_I$  und der gemessenen Schallintensität  $L_M$

$$L_I - L_M = -10 \lg \left( 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} \right)^2 \right) \text{ dB.} \quad (4-30)$$

Der Abstand zwischen den Mikrofonen  $\Delta x$  begrenzt damit die maximale Frequenz, die sich unmittelbar aus der Wellenlänge  $\lambda$  ergibt, bis zu der bei einem maximalen Fehler gemessen werden kann. Damit kann die durch die Krümmung der Struktur verursachte Verschiebung der Abstrahlungsebene (gepunktete Linie in Abbildung 4-27) als Abstand  $\Delta x$  aufgefasst werden. Setzt man weiterhin voraus, dass sich die Intensitätsvektoren unmittelbar vor der ebenen und der leicht gekrümmten Strahleroberfläche lediglich durch ihre Richtung unterscheiden ( $|\mathbf{I}_e| = |\mathbf{I}_b|$ ) und der Winkel zwischen beiden Vektoren klein ist, lässt sich eine Messung beider Fälle an ein und derselben Position als virtuelle Verschiebung des Messpunktes oder des Mikrofonabstandes  $\Delta x$  interpretieren, wie in Abbildung 4-27 dargestellt. Damit kann der Abstand  $\Delta x$  als Kuppel- oder Domhöhe einer gekrümmten Struktur gegenüber der Einspannebene aufgefasst werden. Aus den zu untersuchenden Frequenzen und zugehörigen Schwingformen der Struktur kann auf die Biegewellenlänge und damit der Fehler ohne Intensitätsmessung abgeschätzt werden.

<sup>26</sup> Eine vollständige Herleitung der Fehlerschranken für die Messung der Schallintensität mit zwei Druckmikrofonen findet sich u. a. in MÖSER [179].

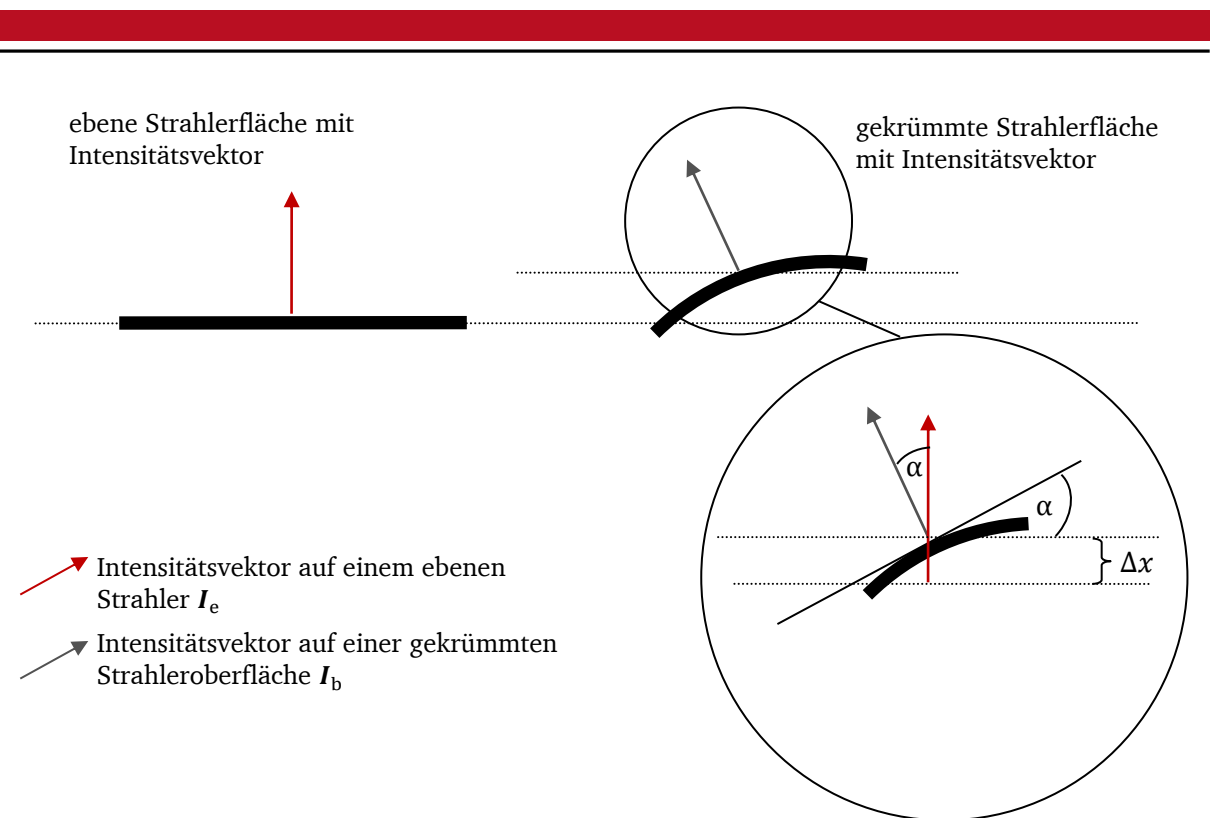


Abbildung 4-27: Verschiebung der Schallintensitätsvektoren infolge einer gekrümmten Oberfläche

---

## 5 Schalleistungsgerechte Bewertung akustischer Systeme

---

Die in den Kapitel 3 und 4 vorgestellten Verfahrensweisen sollen nachfolgend an Teststrukturen angewandt werden. Auf diese Weise sollen die Methoden nicht nur verdeutlicht, sondern auch gängige „Best-practice-Regeln“ hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit überprüft werden.

---

### 5.1 Abgestrahlte Schalleistung einer gekrümmten Schale

---

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Schwingformklassifikation auf Strukturen, die der Rechteckplatte der Datenbasis ähnlich sind, erfolgt die Anwendung der in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Verfahrensweisen an einer gekrümmten Schalenstruktur. Dazu werden mittels FEM das Eigenverhalten sowie die Schallabstrahlung infolge einer harmonischen Kraftanregung ( $\hat{F} = 1 \text{ N}$ ) im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1000 Hz mittels BEM simuliert. Die Schale hat die gleichen Abmessungen in der Ebene und die projizierte Fläche der Schale stimmt mit der Fläche der Rechteckplatte aus Abschnitt 4.2.1.1 überein. Die Position, an der die harmonische Kraft an der Struktur angreift, befindet sich auf der Schalenoberfläche und ist in  $x$ -Richtung 45 mm und in  $y$ -Richtung 135 mm vom Koordinatenursprung entfernt. Abbildung 5-17 in Abschnitt 5.3 zeigt die Dimensionen der Schale.

Im vorliegenden Fall wird die Schalengeometrie aus Schalenelementen mit einer Dicke von 0,8 mm erzeugt und als Materialmodell werden die Materialparameter einer Aluminiumlegierung zugrunde gelegt. Die Materialparameter sind in Tabelle 5-1 aufgeführt.

Tabelle 5-1: Verwendete Materialparameter der Schale

| Parameter            | Ausprägung             |
|----------------------|------------------------|
| E-Modul              | 70 kN/mm <sup>2</sup>  |
| Querkontraktionszahl | 0,34                   |
| Dichte               | 2750 kg/m <sup>3</sup> |
| Dämpfung             | 0,4 %                  |

Als Randbedingung wird in der Simulation eine allseits gelenkige Lagerung angenommen, was bedeutet, dass die Auslenkung  $w$  der Schale am Rand der Geometrie verschwindet

$$w(x_{Rand}, y_{Rand}) = 0. \quad (5-1)$$

Unter den gegebenen Randbedingungen liefert eine numerische Modalanalyse 10 Eigenfrequenzen im Frequenzbereich bis 1000 Hz. Eine Auswertung der Oberflächenschnelle bei einer harmonischen Kraftanregung normal zur Grundebene der Schale ( $z$ -Richtung, siehe Abbildung 5-18) führt zu zehn Peaks im Verlauf der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle. Zwischen den am stärksten ausgeprägten Peaks und den schwächer ausgeprägten Peaks liegen bei Pegeldarstellung ca. 15 dB. Zieht man eine Grenze genau in der Mitte (in Pegeldarstellung) zwischen dem am stärksten ausgeprägten und dem niedrigsten Peak, liegen drei der Peaks



oberhalb dieser Grenze und sieben im unteren Bereich. Die Anwendung eines Entscheidungsbaumes im Sinne von Abschnitt 4.4.3 ermöglicht die Bewertung der abgestrahlten Schallleistung eines jeden Peaks. Dabei werden die drei Peaks mit einer vergleichsweise hohen Oberflächenschnelle mit  $v^+$  gekennzeichnet und die Peaks mit den niedrigeren Oberflächenschnellen mit  $v^-$ . Die Klassifikation der Peaks in Abstrahlgradklassen erlaubt eine Bewertung im Hinblick auf die abgestrahlte Schallleistung. Die Schallleistung wird dann, wie in Tabelle 5-2 verdeutlicht, entweder als *voraussichtlich hoch*  $P^+$ , *voraussichtlich niedrig*  $P^-$  oder als *unspezifizierbar*  $P^?$  bezeichnet. Diese Bezeichnungen sind analog zu den Bewertungen der Schwingformen als *kritisch*, *unkritisch* und *unspezifiziert* des Entscheidungsbaumes (siehe Abbildung 4-25), der in Abschnitt 4.4.3 beschrieben ist.

Tabelle 5-2: Bewertung der Schwingformen hinsichtlich der abgestrahlten Schallleistung

|                    | hohe Schnelle | niedrige Schnelle |
|--------------------|---------------|-------------------|
| Abstrahlgradklasse | $v^+$         | $v^-$             |
| $K^{\sigma^+}$     | $P^+$         | $P^?$             |
| $K^{\sigma^-}$     | $P^?$         | $P^-$             |
| $K^{\sigma^?}$     | $P^?$         | $P^?$             |

Wertet man die Schnellepeaks aus, die bei einer harmonischen Kraftanregung mit einer Kraft von 1 N, die normal zur Oberfläche an der Anregungsstelle angreift, entstehen, erhält man 9 Schwingformen, die als *unspezifiziert* klassifiziert werden. Folglich ergibt sich dafür eine *unspezifizierbare* abgestrahlte Schallleistung  $P^?$ . Eine Schwingform wird als *kritisch* und die abgestrahlte Schallleistung als *voraussichtlich hoch*  $P^+$  klassifiziert.

Die ersten beiden Schwingformen strahlen mit Abstand die höchste Schallleistung ab. Dabei wird die höchste Schallleistung von der ersten Schwingform (Abbildung 5-1) abgestrahlt. Diese wird jedoch nicht als *kritisch*, sondern als *unspezifiziert* klassifiziert. Lediglich die zweite Schwingform (Abbildung 5-2) wird als *kritisch* klassifiziert. In beiden Fällen ist die mittlere quadratische Oberflächenschnelle vergleichsweise hoch ( $v^+$ ). In den folgenden Abbildungen sind die Betriebsschwingformen auf die maximale Schnelle einer Schwingform normiert.

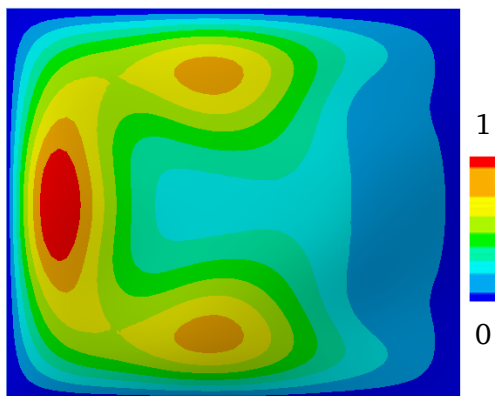


Abbildung 5-1: Erste Betriebsschwingform der Schale bei ca. 400 Hz ( $L_W = 108,3$  dB,  $v^+$ ,  $K^{\sigma^?}$ )

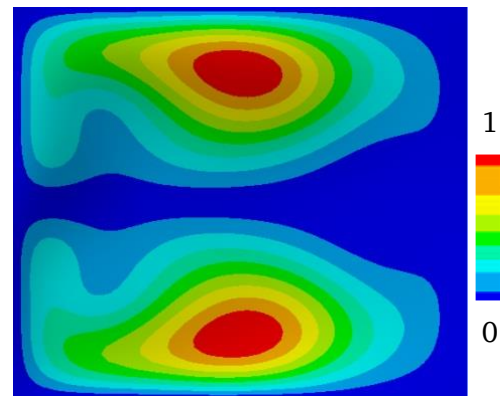


Abbildung 5-2: Zweite Betriebsschwingform der Schale bei ca. 432 Hz ( $L_W = 101,2$  dB,  $v^+$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

Die 3. Schwingform (Abbildung 5-3) strahlt die dritthöchste Schallleistung ab. Auch ihr Schnel-  
 lefeld weist eine vergleichsweise hohe mittlere quadratische Oberflächenschnelle ( $v^+$ ) auf. Al-  
 lerdings wird die Schwingform als *unspezifiziert* klassifiziert. Der 4. Schwingform wird zwar ein  
 hoher Abstrahlgrad zugeordnet, da sie aber nur eine geringe mittlere quadratische Oberflächens-  
 schnelle aufweist, wird sie als *unspezifiziert* ( $P^?$ ) klassifiziert.

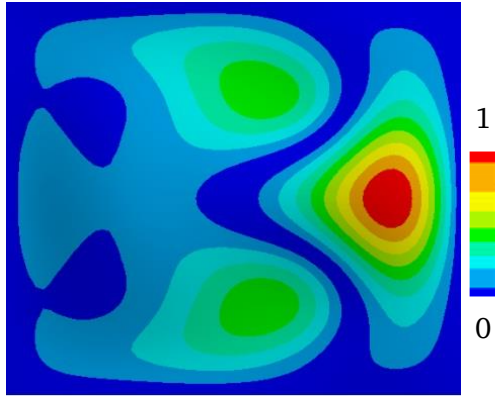


Abbildung 5-3: Dritte Betriebsschwingform der  
 Schale bei ca. 516 Hz ( $L_W = 97,7$  dB,  $v^+$ ,  $K^{\sigma^?}$ )

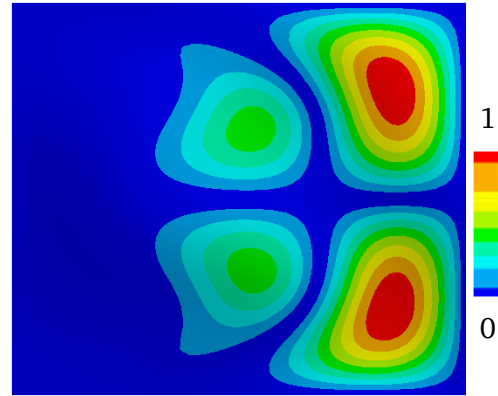


Abbildung 5-4: Vierte Betriebsschwingform der Schale  
 bei ca. 608 Hz ( $L_W = 86,2$  dB,  $v^-$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

Auch die 5. bis 10. Schwingformen (Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-10) werden als *unspezifiziert*  
 ( $P^?$ ) klassifiziert, da sie Klassen mit hohen Abstrahlgraden ( $K^{\sigma^+}$ ) zugeordnet werden und  
 gleichzeitig niedrige mittlere quadratische Oberflächenschnellen ( $v^-$ ) aufweisen.

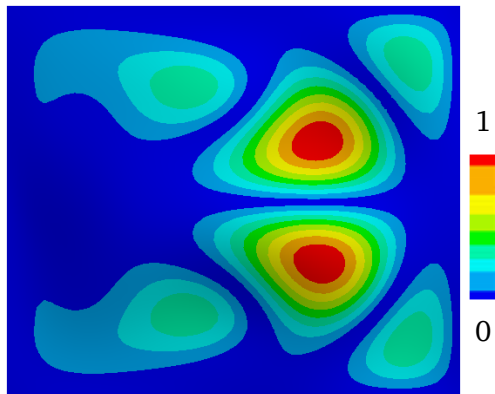


Abbildung 5-5: Fünfte Betriebsschwingform der  
 Schale bei ca. 670,7 Hz ( $L_W = 86,6$  dB,  $v^-$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

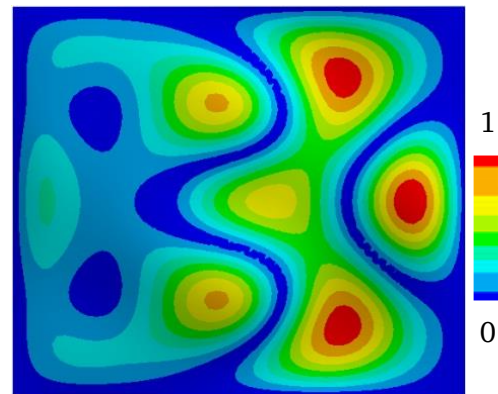


Abbildung 5-6: Sechste Betriebsschwingform der  
 Schale bei ca. 671,3 Hz ( $L_W = 86,6$  dB,  $v^-$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

Da die Klassifikation in nicht *unspezifizierte* Klassen keinen Mehrwert für einen Entwickler dar-  
 stellt, bleibt die Bewertung der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen der Schwingfor-  
 men. Dabei fällt auf, dass bei jeweils vergleichsweise niedrigen mittleren quadratischen Ober-  
 flächenschnellen sehr unterschiedliche Schallleistungen abgestrahlt werden. So liegen zwischen  
 dem Pegel der abgestrahlten Schallleistung von  $L_W = 94,3$  dB der 10. Betriebsschwingform und  
 dem Pegel der abgestrahlten Schallleistung der 9. Betriebsschwingform von  $L_W = 83,6$  dB mehr  
 als 10 dB Differenz. Damit wird verdeutlicht, dass die Oberflächenschnelle alleine keine

belastbare Größe zur Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung darstellt und eine Vernachlässigung des Abstrahlgrades nicht gerechtfertigt ist.

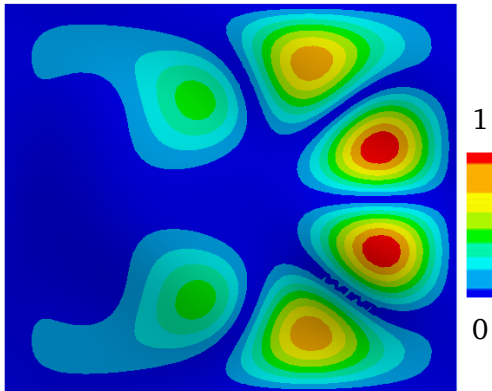


Abbildung 5-7: Siebte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 806 Hz ( $L_W = 90,1 \text{ dB}$ ,  $v^-$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

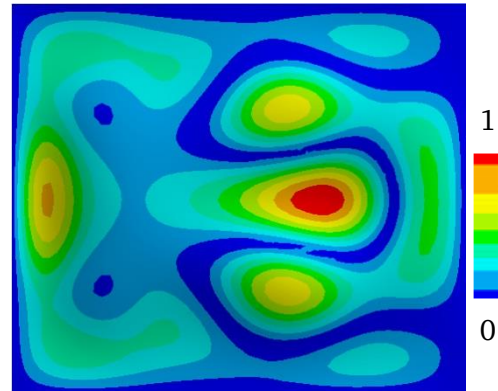


Abbildung 5-8: Achte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 809 Hz ( $L_W = 89,5 \text{ dB}$ ,  $v^-$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

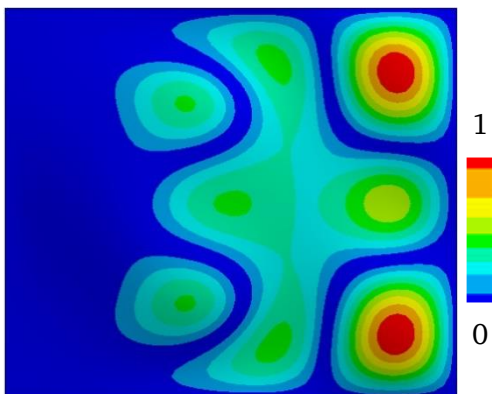


Abbildung 5-9: Neunte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 822 Hz ( $L_W = 83,6 \text{ dB}$ ,  $v^-$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

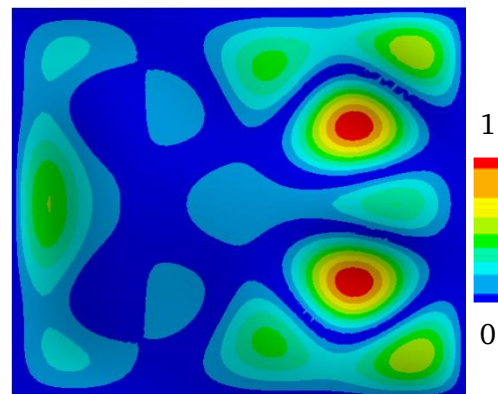


Abbildung 5-10: Zehnte Betriebsschwingform der Schale bei ca. 942 Hz ( $L_W = 94,3 \text{ dB}$ ,  $v^-$ ,  $K^{\sigma^+}$ )

Abbildung 5-11 zeigt den Pegel des Abstrahlgrades der untersuchten Schale. Es ist gut zu erkennen, dass die Schwankungen im untersuchten Frequenzbereich erheblich sind und mit steigender Frequenz nicht automatisch ein höherer Abstrahlgrad zu erwarten ist. Eine Betrachtung der Ausprägungen an den Frequenzen der untersuchten Betriebsschwingformen zeigt, dass die Schwankungen von Schwingform zu Schwingform erheblich sind. Betrachtet man beispielsweise die 9. Betriebsschwingform bei ca. 822 Hz und die 10. Betriebsschwingform bei ca. 942 Hz, sieht man den deutlichen Unterschied des Abstrahlgrades.

Interessant ist auch, dass die 1. Betriebsschwingform bei ca. 400 Hz als starker Strahler klassifiziert wird und auch der Abstrahlgrad ein relatives Maximum aufweist, die 2. Betriebsschwingform aber eher einen niedrigeren Abstrahlgrad aufweist, obwohl sie als starker Strahler klassifiziert wurde. Das deutet darauf hin, dass es sich vermutlich um eine Fehlklassifikation handelt. Dennoch emittiert die Schale in der 2. Betriebsschwingform eine vergleichsweise hohe Schallleistung.

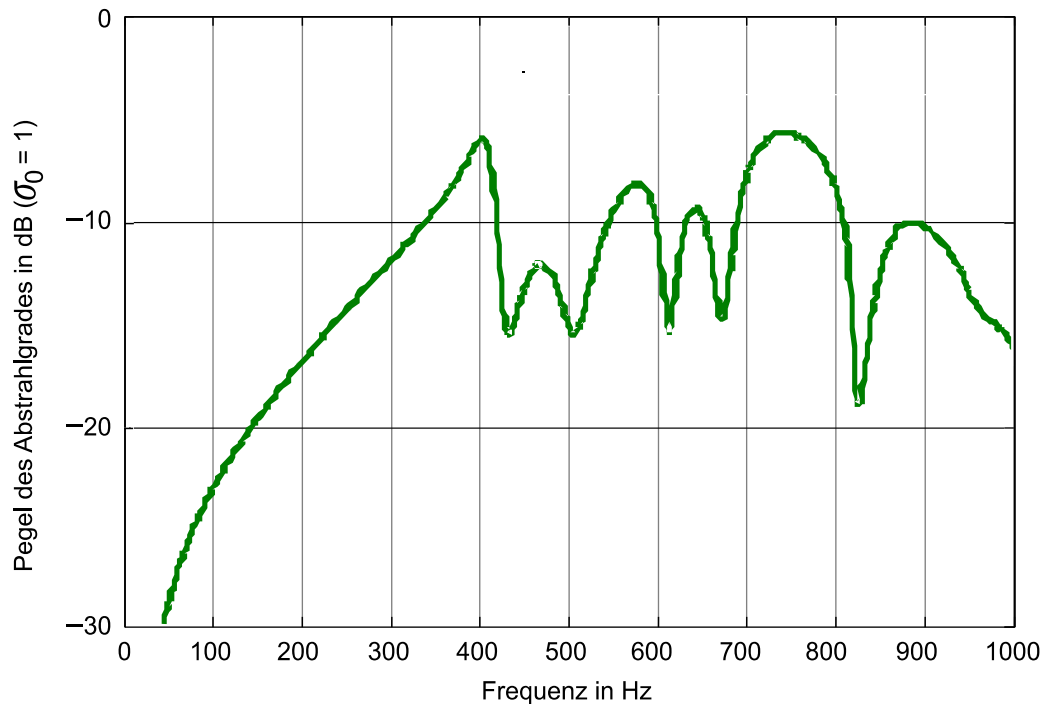


Abbildung 5-11: Pegel des Abstrahlgrades der harmonisch kraftangeregten Schalenstruktur

## 5.2 Strukturoptimierung mit Hilfe identifizierter Abstrahlgradklassen

Eine mögliche Anwendung der Klassifizierung von Schwingformen ist die Strukturoptimierung. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, sind die Oberflächenschnelle sowie die daraus abgeleitete ERP regulär verwendete Zielfunktionen in der akustischen Strukturoptimierung. Diese beiden Größen werden in der Regel als Substitut für die abgestrahlte Schallleistung verwendet, um den Rechenaufwand für eine Berechnung der Schallabstrahlung zu vermeiden. Da bei der Verwendung der Oberflächenschnelle der Abstrahlgrad vernachlässigt und bei der Verwendung der ERP  $\sigma = 1$  gesetzt wird, führen Optimierungen mit diesen beiden Zielfunktionen nicht in jedem Fall auch zu einer optimierten Schallleistung. Dennoch werden beide Zielfunktionen häufig verwendet. Das liegt u. a. an der nötigen Simulationsdauer. Denn je nach Simulationsverfahren und Geometrie benötigt die Simulation der abgestrahlten Schallleistung oft ein Vielfaches der Zeit, die eine Körperschallsimulation benötigt.

Das in Abschnitt 4.4.3 skizzierte Vorgehen zur schallleistungsgerechten Bewertung von Schnellefeldern schlägt die Klassifikation untersuchter Schnellefelder und die anschließende Bewertung anhand von Abstrahlgradklassen vor. Dieser Ansatz lässt sich in der Strukturoptimierung einsetzen.

Als Anwendungsbeispiel dient eine Aluminiumplatte mit rechteckiger Grundfläche und veränderlicher Dicke. Zur Variation der Dicke wird eine radiale Basisfunktion (RBF) verwendet, deren Zentrum auf der Platte variiert werden kann. Radiale Basisfunktionen verhalten sich

radialsymmetrisch zu ihrem Zentrum und der Funktionswert hängt nur vom Abstand zum Zentrum ab. Die Plattendicke  $h(x, y)$  wird mit der Gleichung

$$h(x, y) = h_0 + \hat{h}e^{-\chi((x-x_m)^2+(y-y_m)^2)} \quad (5-2)$$

bestimmt. Darin steht  $h_0$  für die Grunddicke der Platte, die bei  $h_0 = 0,8$  mm liegt,  $\hat{h}$  ist die maximale zusätzliche Plattendicke (mit  $0 \text{ mm} \leq \hat{h} \leq 5,2$  mm) und  $\chi$  (mit  $0 \leq \chi \leq 20$ ) ist ein Steuerparameter, der die Steigung der RBF steuert. Die Variablen  $x_m$  und  $y_m$  beschreiben das Zentrum der RBF.

Die Platte wird mit einer harmonischen Einzelkraft normal zur Mittelebene der Platte an der Stelle ( $x = 55$  mm |  $y = 10$  mm) angeregt und die Abmessungen der rechteckigen Grundfläche sind dabei mit denen der modifizierten Rechteckplatte aus Abschnitt 4.2.1.1 (300 mm x 260 mm) identisch. Als Randbedingung liegt eine allseits gelenkige Lagerung vor. Die Ausgangsdicke zur Optimierung liegt bei  $h_0 = 0,8$  mm.

Die in der Simulation verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 5-1 im vorherigen Abschnitt 5.1 aufgeführt. Das Modell der Platte wird als FE-Modell in ANSYS implementiert, wobei eine Elementgröße von  $\Psi = 10$  mm gewählt wird. Als Elemente werden Schalenelemente vom Type `Shell 93` mit 8 Knoten und quadratischen Ansatzfunktionen verwendet. Damit ist sichergestellt, dass selbst bei einer durchgängigen Plattendicke von 6 mm (Biegewellenlänge  $\lambda_B > 20$  mm bei  $f = 100$  Hz) die Vernetzung ausreichend groß ist, um das Strukturverhalten der Platte wiedergeben zu können.

Zur Anwendungsdemonstration wird zunächst die Summe der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen der ersten drei Eigenfrequenzen optimiert. Die Summenbildung der Schnelle über die ersten drei Eigenfrequenzen erfolgt, damit beim zweiten Optimierungsexperiment möglichst unterschiedliche Schwingformen auftreten und klassifiziert werden können und so die Wahrscheinlichkeit steigt, dass nicht nur die Schnelle optimiert wird. In einem zweiten Schritt erfolgt die Optimierung der Summe der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen der ersten drei Eigenfrequenzen, wobei jeweils eine Gewichtung mit einem Faktor  $\omega^\sigma$  erfolgt, der von der identifizierten Abstrahlgradklasse  $K$  abhängt. Als Nebenbedingung gilt, dass die Platte maximal das Doppelte der Masse  $m_0$  annehmen darf, die die Platte bei einer konstanten Dicke von  $h = 0,8$  mm hat (ca. 0,172 kg).

Das erste Optimierungsproblem lautet folglich

$$\min(\bar{v}_1^2 + \bar{v}_2^2 + \bar{v}_3^2) \text{ mit der Nebenbedingung } m \leq 2m_0. \quad (5-3)$$

Als Optimierungsalgorithmus wird ein adaptives Antwortflächenverfahren eingesetzt. Der eingesetzte Algorithmus ist in Anhang E beschrieben. Als Designvariablen werden die Variablen

---

$x_m$  und  $y_m$  zur Positionierung des RBF-Zentrums, die maximale zusätzliche Plattendicke  $\hat{h}$  und der Steuerparameter  $\chi$  verwendet.

Das erste Optimierungsproblem (5-3) konvergiert nach 72 Optimierungsschritten und führt zu der Verteilung der Plattendicke, die in Abbildung 5-12 dargestellt ist. Je Optimierungsschritt sind bei 4 Designvariablen 14 Stützstellen zur Approximation der Zielfunktion nötig (siehe Anhang E). Je Stützstelle der Zielfunktion (Gl. 5-3) sind 3 Simulationen nötig, um an drei Frequenzen die Schnelle auszuwerten. Um 72 Optimierungsschritte durchzuführen, sind demnach 3024 Simulationen der Oberflächenschnelle erforderlich. Die Gesamtdauer für die Optimierung beträgt am eingesetzten Rechner<sup>27</sup> ca. 42 Stunden.

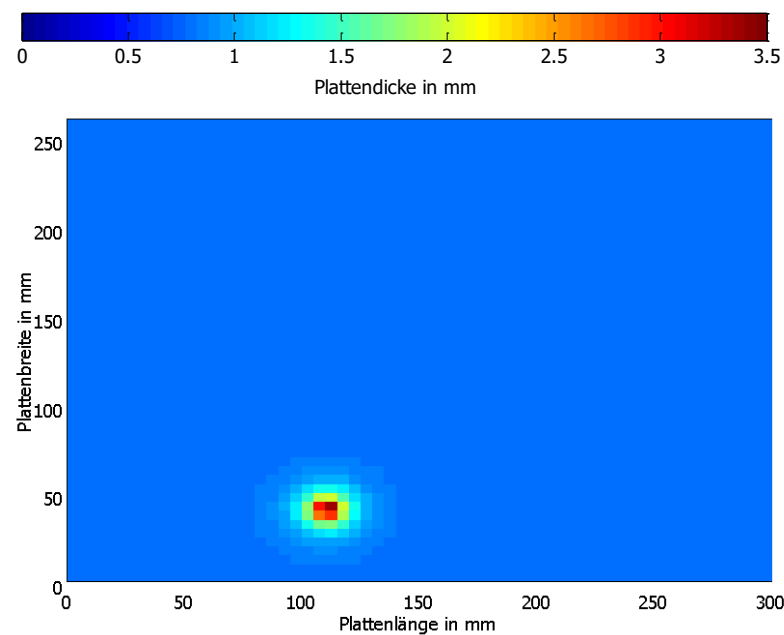


Abbildung 5-12: Dickenverteilung der Optimierung der Summe der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen an den ersten drei Eigenfrequenzen

Das RBF-Zentrum befindet sich in der Nähe des Krafteinleitungspunktes und die Plattenmasse liegt bei  $m = 0,255$  kg. Die sich an den ersten drei Eigenfrequenzen einstellenden Betriebschwingformen, deren mittlere quadratische Oberflächenschnellen zur Summenbildung verwendet wurden, sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Die Darstellung ist jeweils auf die maximale Schnelle normiert.

---

<sup>27</sup> Zur Berechnung wurde ein Desktop-PC mit einem 4-Kern-Prozessor vom Typ intel CORE i5 vPro (4. Generation) mit 6 MB Cache verwendet. Der Rechner verfügt über 8 GB Arbeitsspeicher und arbeitet mit dem Betriebssystem Windows 7.



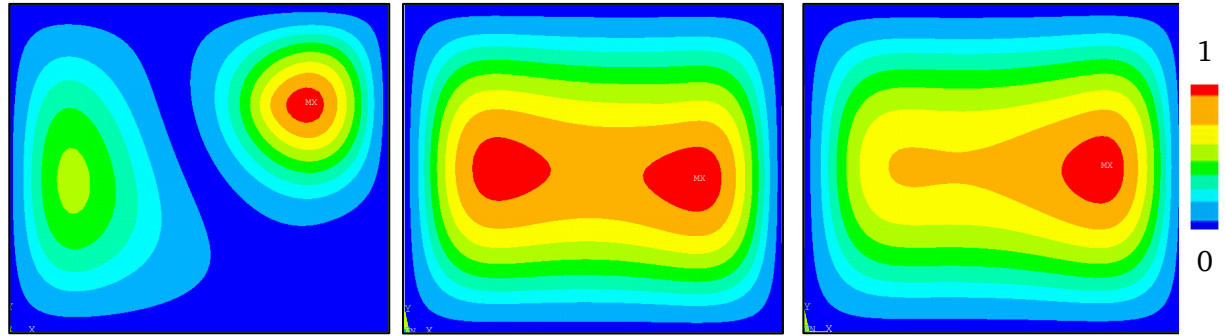


Abbildung 5-13: Betriebsschwingformen zu den ersten drei Eigenfrequenzen (links erste Eigenfrequenz, mittig zweite Eigenfrequenz, rechts dritte Eigenfrequenz) der Platte mit Dickenverteilung nach Optimierung des Summenpegels der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen (auf die maximale Schnelle normiert)

Die Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen, die den Schwingformen zugeordnet werden, sowie die jeweiligen Schallleistungspegel, die Eigenfrequenzen und, der Vollständigkeit halber, die identifizierten Abstrahlgradklassen sind nachfolgend in Tabelle 5-3 aufgeführt. Die Abstrahlgradklassen wurden im Rahmen der Optimierung jedoch nicht berücksichtigt.

Tabelle 5-3: Ergebnis der Optimierung der Summe der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen

|                   | Schallleistungspegel in dB | Frequenz in Hz | Pegel von $\bar{v}_t^2$ in dB | Abstrahlgradklasse |
|-------------------|----------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------|
| 1. Eigenfrequenz  | 85,9                       | 136,5          | -82,2                         | $K^{\sigma^+}$     |
| 2. Eigenfrequenz  | 81,4                       | 302,5          | -82,8                         | $K^{\sigma^?}$     |
| 3. Eigenfrequenz  | 89,0                       | 383,1          | -83,3                         | $K^{\sigma^?}$     |
| Summenpegel in dB | 91,2                       | -              | -78,0                         | -                  |

Im nächsten Schritt wird eine Zielfunktion optimiert, die die Abstrahlgradklassen berücksichtigt. Dazu werden die mittleren quadratischen Oberflächenschnellen jeweils mit einem Faktor  $\omega^\sigma$  gewichtet, der von der Abstrahlgradklasse  $K^\sigma$  abhängt, in die das zugrunde gelegte Schnellefeld klassifiziert wurde. Auch hier gilt die Nebenbedingung, die bereits im ersten Fall verwendet wurde. Das zu lösende Optimierungsproblem, lautet

$$\min(\omega_1^\sigma \bar{v}_1^2 + \omega_2^\sigma \bar{v}_2^2 + \omega_3^\sigma \bar{v}_3^2) \text{ mit der Nebenbedingung } m \leq 2m_0. \quad (5-4)$$

Dabei werden die Gewichtungen durch die Abstrahlgradklassen über Faktoren  $\omega^\sigma$  realisiert, für die

$$\omega^\sigma = \begin{cases} 0,5 & \text{wenn } K^\sigma \in K^{\sigma^-} \\ 1 & \text{wenn } K^\sigma \in K^{\sigma^?} \\ 2 & \text{wenn } K^\sigma \in K^{\sigma^+} \end{cases} \quad (5-5)$$

gilt. Aufgrund der Gewichtung wird die Konvergenz des Optimierungsverfahrens hin zu Schwingformen gesteuert, die einer Abstrahlgradklasse angehören, die einem niedrigen Abstrahlgrad zugeordnet werden. Das zweite Optimierungsproblem (5-4) konvergiert nach 77 Optimierungsschritten. Die Gesamtdauer der Optimierung liegt, bei Verwendung des gleichen Computers, aufgrund der 3234 nötigen Simulationsaufrufe bei ca. 45:49 Stunden. Die Klassifikation einer Schwingform dauert ca. 1 Sekunde.

Das RBF-Zentrum befindet sich am Plattenrand auf der Seite, die der Krafteinleitung gegenüberliegt. Die Plattenmasse liegt bei  $m = 0,290$  kg und somit über der Masse der Platte, bei der nur die Schnelle optimiert wurde. Abbildung 5-14 zeigt die optimierte Dickenverteilung der Platte.

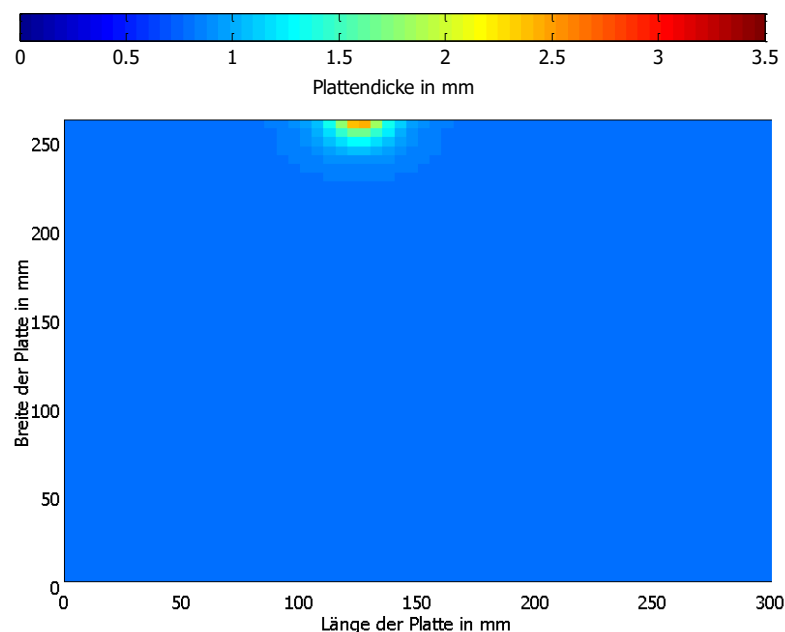


Abbildung 5-14: Dickenverteilung der Platte nach Lösung des zweiten Optimierungsproblems

Die sich bei Anregung mit den ersten drei Eigenfrequenzen einstellenden Betriebsschwingformen, deren mittlere quadratische Oberflächenschnellen zur Summenbildung verwendet wurden, sind in Abbildung 5-15 dargestellt. Die Darstellung ist jeweils auf die maximale Schnelle normiert.

Die Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen, die den Schwingformen zugeordnet werden, sowie die jeweiligen Schallleistungspegel, Eigenfrequenzen und identifizierten Abstrahlgradklassen sind nachfolgend in Tabelle 5-4 aufgeführt.



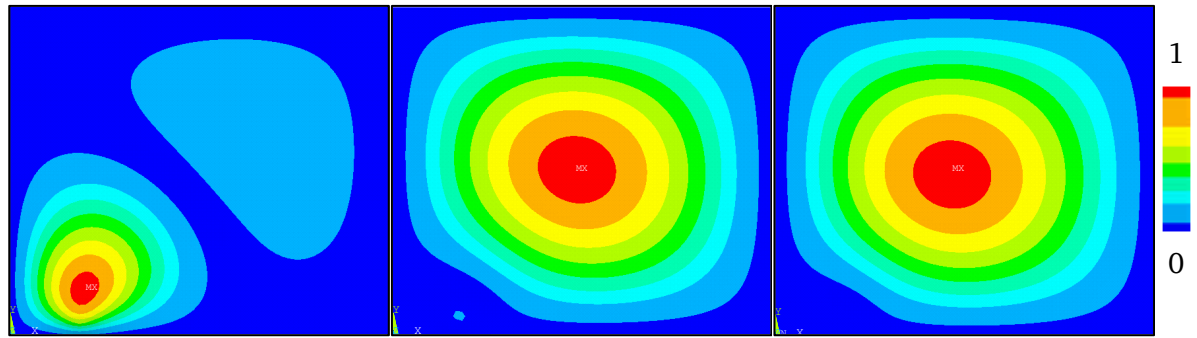


Abbildung 5-15: Betriebsschwingformen zu den ersten drei Eigenfrequenzen (links erste Eigenfrequenz, mittig zweite Eigenfrequenz, rechts dritte Eigenfrequenz) der Platte mit Dickenverteilung nach Optimierung des Summenpegels der gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnelle (auf die maximale Schnelle normiert)

Beide Optimierungsprozeduren führen zu einer Reduzierung der abgestrahlten Schallleistung gegenüber dem Schallleistungspegel von ca. 95 dB im Falle der einfachen 0,8 mm dicken Rechteckplatte unter gleichen Rand- und Anregungsbedingungen. Dazu wird zusätzliche Masse auf der Platte verteilt, was aufgrund der lokalen Biegesteifigkeitserhöhung einerseits zu einer Anhebung der Eigenfrequenzen führt und andererseits Schwingformen erzeugt, die sich von denen der einfachen Rechteckplatte erheblich unterscheiden.

Tabelle 5-4: Ergebnis der Optimierung der Summe der gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnellen

|                   | Schallleistungspegel in dB | Frequenz in Hz | Pegel von $\overline{\tilde{v}_t^2}$ in dB | Abstrahlgradklasse |
|-------------------|----------------------------|----------------|--|--------------------|
| 1. Eigenfrequenz  | 88,6                       | 150,50         | -86,6                                      | $K^{\sigma^+}$     |
| 2. Eigenfrequenz  | 81,7                       | 328,71         | -87,2                                      | $K^{\sigma^-}$     |
| 3. Eigenfrequenz  | 84,7                       | 368,18         | -87,4                                      | $K^{\sigma^-}$     |
| Summenpegel in dB | 90,7                       | -              | -82,3                                      | -                  |

Beim ersten Optimierungsproblem (5-3) wird die erste Schwingform als starker Strahler identifiziert, während über die zweite und dritte Schwingform keine anwendbare Aussage hinsichtlich ihres Abstrahlverhaltens gemacht werden kann, da sie nicht identifiziert und deshalb der Klasse  $K^{\sigma^?}$  zugeordnet werden. Beim zweiten Optimierungsproblem (5-4) wird die erste Schwingform als starker Strahler identifiziert und die zweite und dritte Schwingform als schwacher Strahler.

Der Unterschied der Summenpegel der Schallleistung zwischen den Lösungen der beiden Optimierungsprozeduren liegt bei ca. 0,6 dB. Demgegenüber steht ein Unterschied zwischen den Summenpegeln der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen der beiden Lösungen von über 4 dB. Zwar werden bei der Lösung des zweiten Optimierungsproblems zwei der drei Schwingformen als schwache Strahler charakterisiert, die mittleren quadratischen Oberflächenschnellen sind jedoch auch geringer als im Fall der Lösung des ersten Optimierungsproblems.

---

Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass der Optimierungsalgorithmus im Fall des ersten Optimierungsproblems in einem lokalen Optimum konvergiert, da die Lösung des zweiten Optimierungsproblems auch eine Lösung des ersten Optimierungsproblems darstellt, die der zuerst gefundenen Lösung (siehe Tabelle 5-3) überlegen ist. Dieser Sachverhalt zeigt auch, dass die zu optimierende Zielfunktion für den verwendeten Optimierungsalgorithmus (siehe Anhang E) nicht ausreichend konvex ist.

---

### **5.3 Auslegung eines resonant shunt damping mit Hilfe von Abstrahlgradklassen**

---

Ein Ansatz zur Lärminderung ist die allgemeine Körperschallminderung. Mögliche Lösungen sind u. a. die aktive Kompensation oder Dämpfung sowie die Tilgung. Tilger können sowohl mechanisch als auch elektromechanisch ausgeführt werden. Das resonant shunt damping ist ein elektromechanischer Tilger, der aus einem piezoelektrischen Wandler, einem elektrischen Widerstand sowie einer Induktivität besteht. Die Piezokeramik wirkt als kapazitives Bauelement (Kondensator), welches mit der Induktivität und dem elektrischen Widerstand einen elektrischen Schwingkreis bildet [110, 111]. Verwendet man als piezoelektrischen Wandler einen Biegezellenwandler (auch Piezo-Patch), werden mechanische Deformationen in elektrische Energie gewandelt. Wird die Resonanzfrequenz des Schwingkreises auf eine Resonanz des mechanischen Systems eingestellt, deren Deformation zu einer Deformation des piezoelektrischen Wandlers führt, wirkt das gekoppelte System als elektromechanischer Tilger. Die Tilgerwirkung wird dabei maßgeblich vom elektromechanischen Kopplungsfaktor des eingesetzten keramischen Wandlers bestimmt. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Auslegung eines resonant shunt damping in der Regel die Position des piezoelektrischen Wandlers so gewählt, dass der höchstmögliche Kopplungsfaktor erreicht wird [110, 111, 180].

Handelt es sich bei dem resonant shunt damping um eine Applikation eines Piezo-Patches auf einer flächigen Struktur, wie in Abbildung 5-16 skizziert, so ändern sich mit der Variation der Position des Flächenaktors auf der Struktur nicht nur die elektromechanischen Kopplungsfaktoren des Aktors in den unterschiedlichen Eigenformen, sondern auch die Eigenformen und die sich einstellenden Betriebsschwingformen selbst. Diese Änderung der Schwingformen wirft die Frage auf, ob es anstatt einer alleinigen Optimierung des elektromechanischen Kopplungsfaktors nicht sinnvoll ist, auch die Abstrahlcharakteristik der sich einstellenden Schwingformen zu berücksichtigen. So kann eine optimale Tilgerwirkung in Verbindung mit einer stark schallabstrahlenden Schwingform zu einer hohen abgestrahlten Schallleistung führen und eine geringere Tilgerwirkung zusammen mit einer schwach schallabstrahlenden Schwingform in einer vergleichsweise niedrigeren abgestrahlten Schallleistung resultieren. Diese Problemstellung soll nachfolgend am Beispiel einer Schalenstruktur mit applizierter Piezokeramik erörtert werden.

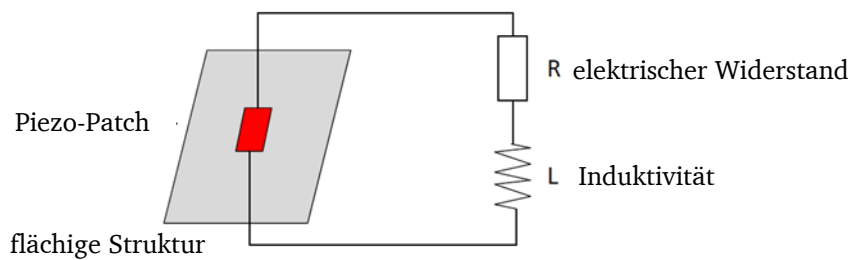


Abbildung 5-16: Prinzip eines resonant shunt damping [180]

Die Erörterung erfolgt anhand der Ergebnisse numerischer Simulationen, wobei die Struktursimulationen mittels der FEM durchgeführt werden und die Schallabstrahlung mit einem Verfahren der BEM, wie auch in Abschnitt 4.2 sowie in Anhang A beschrieben.

Abbildung 5-17 zeigt die Dimensionen der gekrümmten Schalenstruktur, auf der sich ein piezokeramischer Flächenaktor (rotes Rechteck) verschieben lässt. Als Designvariablen des Optimierungsproblems dienen die Parameter  $x_{\text{posi}}$  und  $y_{\text{posi}}$ , welche die Position der Piezokeramik auf der Schale steuern. Die Schale hat eine Dicke von 0,8 mm und besteht aus einer Aluminiumlegierung, wie sie auch schon in den Beispielen der Abschnitte 5.1 und 5.2 eingesetzt wird.

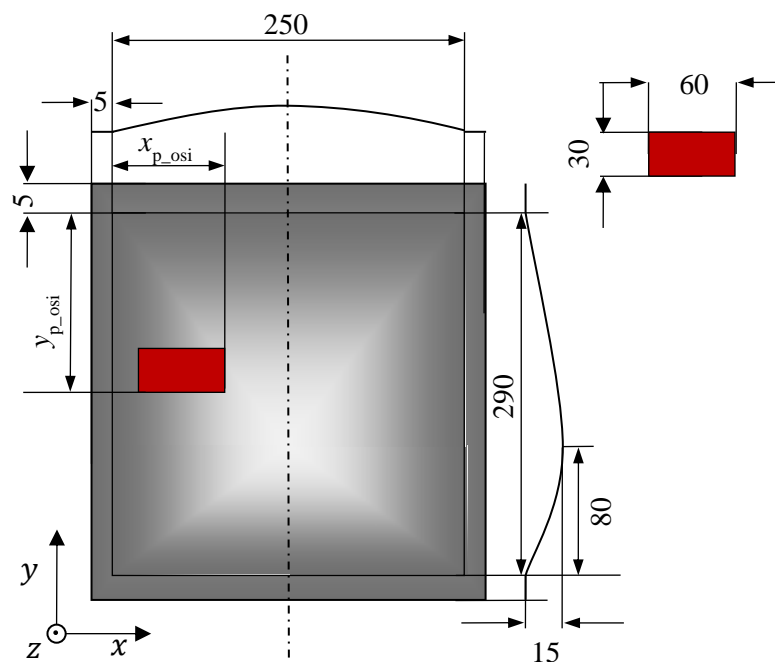


Abbildung 5-17: Dimensionen der Schalenstruktur und Position des piezokeramischen Flächenaktors

Zur Durchführung von Simulationen wird ein parametrisches FE-Modell der Schale in ANSYS implementiert. Abbildung 5-18 zeigt das Modell sowie das zugrunde gelegte Koordinatensystem.

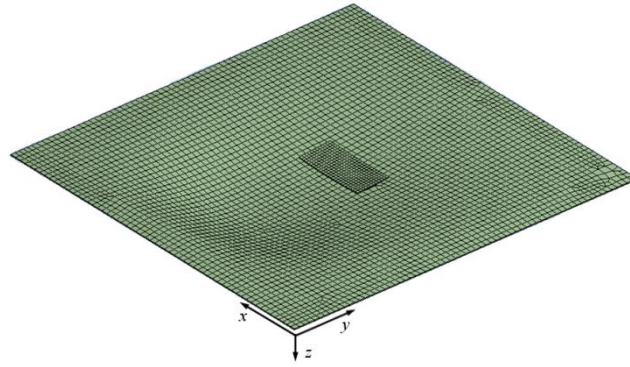


Abbildung 5-18: FE-Modell der Schalenstruktur mit appliziertem piezokeramischem Flächenaktor

Es ist ersichtlich, dass sehr kleine Elemente (maximale Elementgröße 5 mm) verwendet werden. Die Elementgröße wird deshalb so gering gewählt, da Konvergenzuntersuchungen mit applizierter Piezokeramik zeigen, dass die gitterunabhängige Lösung erst mit einer derartig feinen Auflösung erreicht wird.

Der piezoelektrische Kopplungsfaktor des applizierten Aktors kann anhand von Modalanalysen mit elektrisch freien Elektroden der Keramik und elektrisch geklemmten Elektroden bestimmt werden. Aus den Eigenkreisfrequenzen des Systems mit offenen Elektroden  $\omega_i^o$  und den Eigenkreisfrequenzen des Systems mit kurzgeschlossenen Elektroden  $\omega_i^s$  ergeben sich die elektromechanischen Kopplungsfaktoren der  $i$ -ten Eigenkreisfrequenz

$$k_i = \sqrt{\frac{\omega_i^o - \omega_i^s}{\omega_i^s}}. \quad (5-6)$$

Variiert man die Position des piezokeramischen Flächenaktors auf der Schale, so ändern sich die Eigenfrequenzen und Eigenformen sowie auch die elektromechanischen Kopplungsfaktoren. Abbildung 5-19 zeigt den Verlauf des elektromechanischen Kopplungsfaktors  $k_1$  der ersten Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Position des Aktors. Den maximalen Kopplungsfaktor erhält man mit  $k_1 = 0,155$  für die Positionsparameter  $x_{\text{posi}} = 100$  mm und  $y_{\text{posi}} = 225$  mm, wobei sich dieser Wert nicht nur an einem diskreten Punkt, sondern vielmehr innerhalb eines Bereiches auf der Schale erreichen lässt (siehe Markierung in Abbildung 5-19).

Die sich infolge einer harmonischen Anregung einstellende erste Betriebsschwingform der Schale mit appliziertem shunt damping, wobei der piezokeramische Flächenaktor kopplungsfaktoroptimiert positioniert ist, ist in Abbildung 5-20 dargestellt. Klassifiziert man die Schwingform mittels des KNN-Klassifikators mit  $c = 100$  Klassen (siehe Abschnitt 4.3.2), wird die Schwingform als Schwingform mit niedrigem Abstrahlgrad  $\sigma^-$  klassifiziert.

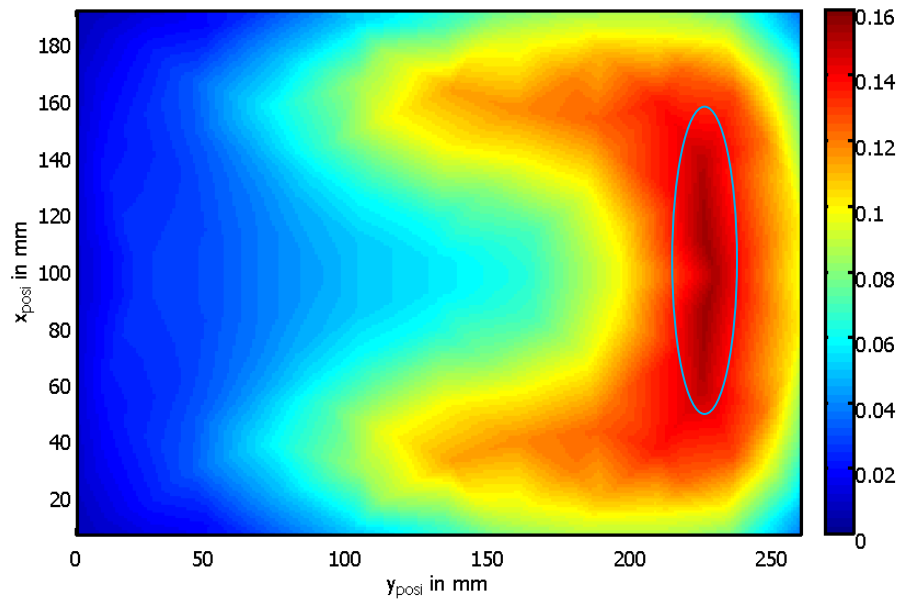


Abbildung 5-19: Elektromechanischer Kopplungsfaktor in Abhängigkeit von der Position des piezokeramischen Flächenaktors mit markiertem Bereich des maximalen Kopplungsfaktors

Optimiert man nicht den Kopplungsfaktor für die erste Eigenfrequenz, sondern die gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnellen (Schnelleoptimierung) bei einer harmonischen Anregung der ersten Eigenfrequenz, stellt sich eine geometrisch verschiedene Schwingform ein. Diese Schwingform ist in Abbildung 5-21 dargestellt. Klassifiziert man diese mit dem gleichen Klassifikator, wird eine Schwingform mit nicht näher charakterisierbarem Abstrahlgrad  $\sigma^?$  identifiziert.

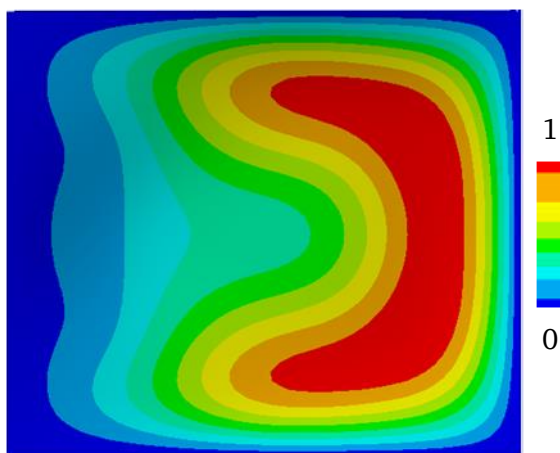


Abbildung 5-20: 1. Betriebsschwingform der Schale (normierte Darstellung) mit appliziertem shunt damping (Position der Piezokeramik bei  $x_{\text{posi}} = 100$  mm und  $y_{\text{posi}} = 225$  mm)

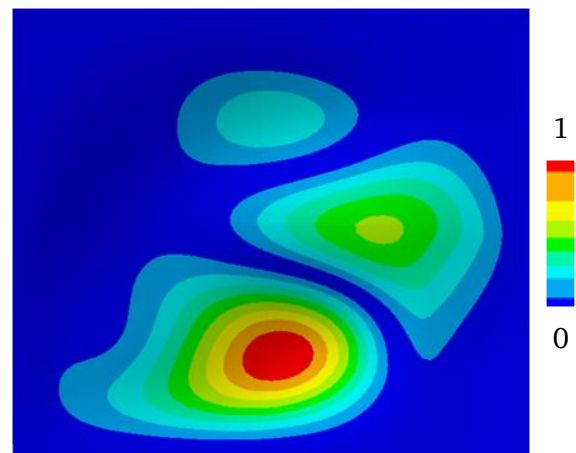


Abbildung 5-21: 1. Betriebsschwingform der Schale (normierte Darstellung) mit appliziertem shunt damping (Position der Piezokeramik bei  $x_{\text{posi}} = 130$  mm und  $y_{\text{posi}} = 205$  mm)

Wertet man die Schallabstrahlung der Schalenstruktur infolge einer harmonischen Kraftanregung normal zur Oberfläche mit  $F = 1$  N im Zentrum der Piezokeramik aus, ergeben sich die in

Tabelle 5-5 zusammengefasst Größen. Interessant ist, dass im Fall der Schnelleoptimierung zwar der Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle um mehr als 3 dB geringer ist, der Pegel der abgestrahlten Schallleistung ins Freifeld<sup>28</sup> dennoch höher ist.

Tabelle 5-5: Ergebnis der Optimierung der Summe der gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnellen

| $x_{\text{posi}}$<br>in mm | $y_{\text{posi}}$<br>in mm | Frequenz<br>in Hz | Pegel von $\overline{\tilde{v}_t^2}$<br>in dB | $L_W$<br>in dB | Abstrahlgrad-<br>klasse |
|----------------------------|----------------------------|-------------------|---|----------------|-------------------------|
| 100                        | 225                        | 407               | −80,2   | 86,6           | $K^{\sigma^-}$          |
| 130                        | 205                        | 419               | −83,5   | 87,2           | $K^{\sigma^?}$          |

Eine Auslegung des Systems unter akustischen Gesichtspunkten würde, ohne Wissen über die abgestrahlte Schallleistung, eine Positionierung der Keramik veranlassen, die zu einer möglichst niedrigen Oberflächenschnelle führt. Zwar wäre der elektromechanische Kopplungsfaktor im vorliegenden Fall nicht optimal, aufgrund der in der Praxis eher geringen Wirkung eines resonant shunt damping würde man hier jedoch die rund 3 dB niedrigere Schnelle als konservatives Auslegungsziel bewerten. Bei einer Auslegung unter Berücksichtigung der Abstrahlgradklassen wäre die Positionierung der Keramik derart erfolgt, dass sie im Maximum des elektromechanischen Kopplungsfaktors appliziert würde. Man hätte sowohl ein optimal ausgelegtes resonant shunt damping als auch eine niedrigere abgestrahlte Schallleistung erreicht.

## 5.4 Experimentelle Validierung

Die Vorgehensweise zur schallleistungsgerechten Bewertung von Schwingformen basiert auf Erkenntnissen, die ausschließlich anhand von numerischen Simulationen gewonnen wurden. Deshalb ist eine Validierung der Erkenntnisse anhand von experimentellen Versuchen am Prüfstand eine Notwendigkeit, um die Methode auf ihre Praktikabilität zu prüfen.

### 5.4.1 Abgestrahlte Schallleistung eines schwingenden Doppelglasfensters

Ein Anwendungsbeispiel für die in den Abschnitten 3 und 4 vorgestellten Methoden ist eine Doppelglasfensterscheibe (DGF), welche ein quaderförmiges akustisch wirksames Volumen eines Prüfstandes abschließt. Der Prüfstand besteht aus einer quaderförmigen Holzbox, deren Wände aus drei Lagen mitteldichter Faserplatten aufgebaut sowie innen und außen mit Aluminiumplatten beklebt sind. Die Oberseite der Box ist offen und kann wahlweise mit einem Spannrahmen oder einem massiven Deckel verschlossen werden. Bis zu einer Frequenz von ca. 500 Hz können die Wände der Box als ideal steif eingestuft werden. Die Box verfügt über eine

<sup>28</sup> Es liegen die gleichen Randbedingungen vor, wie bei der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Rechteckplatte. Die Schallabstrahlung erfolgt ins Freifeld. In der Ebene der Einspannung liegt außerhalb der Schale eine unendliche, ebene schallharte Blende. Die Schale strahlt mit der konkaven Seite ins Freifeld.

---

kreisrunde Wartungsluke in einer Seitenwand, durch die u. a. Kabel geführt werden können. Abbildung 5-22 zeigt den Prüfstand mit montiertem Spannrahmen und seitlicher Wartungsluke in verschlossenem Zustand.

Der Spannrahmen besteht aus einem massiven Oberteil und einem Unterteil aus Stahl, die miteinander verschraubt sind. Zwischen Ober- und Unterteil ist die DGF mit zwei Elastomerdichtungen, die das innere Volumen des Prüfstandes nach außen abdichten, kraftschlüssig montiert.



Abbildung 5-22: Prüfstand mit montiertem Spannrahmen (Akustikdemonstrator des LOEWE-Zentrums AdRIA)

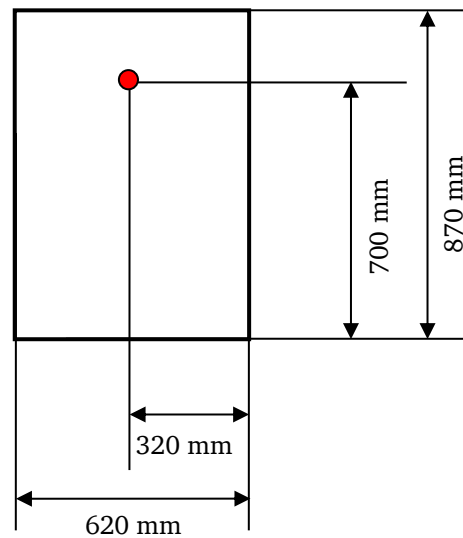


Abbildung 5-23: Abmessung der DGF und Position der Shaker-Anbindung (ohne eingespannte Ränder von umlaufend 20 mm Breite)

Die DGF ist aus zwei Scheiben Floatglas mit einer Dicke von jeweils 4 mm zusammengesetzt. Der Zwischenraum zwischen den beiden Scheiben beträgt 8 mm. Die Abmessungen der Scheibe sowie die Position der Shaker-Anbindung auf der Scheibe können Abbildung 5-23 entnommen werden.

Die DGF wird an der inneren Glasscheibe mit einem Shaker zu Schwingungen angeregt. Auf der äußeren Glasscheibe werden die sich einstellenden Oberflächenschnellefelder mittels eines Scanning-Laservibrometers an 2436 Messpunkten bestimmt.<sup>29</sup> Unter gleichen Rand- und Anregungsbedingungen wird die von der DGF abgestrahlte Schallleistung mit Hilfe eines Schallintensitätsmessverfahrens normkonform (siehe [181]) ermittelt. Dazu werden an 120 Messpunkten, die über der schallabstrahlenden Fensterscheibe angeordnet sind, die Schallschnelle sowie

---

<sup>29</sup> Die Oberflächenschnelle der DGF wurde im Rahmen eines Projektes am LOEWE-Zentrum AdRIA von Herrn Oliver Heuss messtechnisch ermittelt und mit weiteren Projektergebnissen publiziert [120]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf die dankenswerterweise zur Verfügung gestellten Ergebnisse der Oberflächenschnellen (Schwingformen) zurückgegriffen.



der Schalldruck kolloziert gemessen. Eine Beschreibung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Schallleistungsbestimmung befindet sich im Anhang sowie in [120].

Sowohl die Oberflächenschnelle als auch die abgestrahlte Schallleistung sind in Abbildung 5-24 dargestellt. Eine Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass sich erwartungsgemäß an Stellen mit lokalen Maxima der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle auch lokale Maxima in der abgestrahlten Schallleistung befinden. Die Ergebnisse zeigen im Bereich um ca. 200 Hz aber auch, dass ein lokales Schnellmaximum eine vergleichsweise geringe Schallleistung abstrahlen kann.

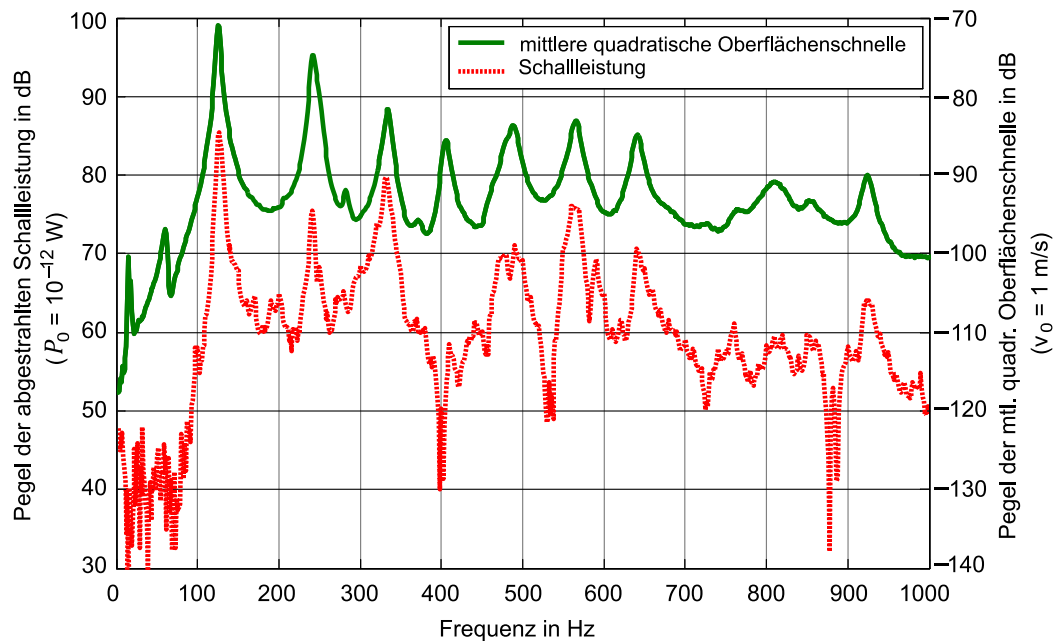


Abbildung 5-24: Pegel der abgestrahlten Schallleistung und Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle einer in einem Spanrahmen montierten und mit einem Shaker angeregten DGF

Klassifiziert man die Schnellefelder an den Stellen lokaler Schnellmaxima und bewertet sie, wie in Abschnitt 4.4 vorgestellt, erhält man zu jedem lokalen Schnellmaximum eine Information darüber, ob es sich um ein Schnellefeld handelt, welches vergleichsweise *stark*, *schwach* oder *unspezifiziert* Schall abstrahlt.

Dazu müssen zunächst die mittels 3D-Laservibrometrie gemessenen Schnellefelder in den Eingaberaum der Klassifikatoren transformiert werden. Das bedeutet, dass die an 2436 Messpunkten gemessenen Schnellefelder des rechteckigen Fensters auf die 2453 Eingangsvariablen der Klassifikatoren angepasst werden müssen. Im vorliegenden Fall unterscheiden sich die Seitenverhältnisse der DGF von denen des Rechtecks der Eingangsvariablen der Klassifikatoren. Daher wird im ersten Schritt das Seitenverhältnis des vermessenen Schnellefeldes derart verzerrt, dass das Seitenverhältnis der Scheibenabmessungen genauso groß wie das Seitenverhältnis der modifizierten Rechteckplatten  $\frac{300 \text{ mm}}{260 \text{ mm}} = 1,15$  ist. Dazu wird der Verzerrungsfaktor  $\varsigma$  bestimmt, mit



dem die längere Seite der zugrunde gelegten rechteckigen Fläche multipliziert werden muss, um ein Seitenverhältnis von 1,15 zu erhalten. Man erhält

$$\varsigma = 1,15 \frac{620 \text{ mm}}{870 \text{ mm}} \approx 0,82. \quad (5-7)$$

Die mit  $\varsigma$  skalierten Schnellefelder der Laservibrometermessung können nun, wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten mittels des KNN-Klassifikators aus Abschnitt 4.3.2 (mit  $c = 100$ ) klassifiziert werden. Die Klassifikation der sieben Schnellefelder der Schnellepeaks im Frequenzbereich bis 500 Hz führt dazu, dass ein Schnellefeld als schwacher Strahler charakterisiert wird, eines als starker Strahler und die anderen als unspezifizierbare Strahler. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst.

Tabelle 5-6: Klassifikation der sieben Schnellepeaks ( $L_{\tilde{v}_t^2} > -90$  dB) im Frequenzbereich bis 500 Hz

| Schwingform | Frequenz<br>in Hz | Pegel von<br>in dB | Pegel der Schall-<br>leistung $L_W$ in dB | Abstrahl-<br>gradklasse |
|-------------|-------------------|--------------------|---|-------------------------|
| 1           | 62,4              | -71,0              | 84,0                                      | $K^{\sigma^-}$          |
| 2           | 120,6             | -74,8              | 77,1                                      | $K^{\sigma^?}$          |
| 3           | 166,8             | -81,8              | 79,7                                      | $K^{\sigma^+}$          |
| 4           | 202,4             | -85,6              | 42,1                                      | $K^{\sigma^?}$          |
| 5           | 243,4             | -83,9              | 66,7                                      | $K^{\sigma^?}$          |
| 6           | 282,3             | -83,2              | 75,6                                      | $K^{\sigma^?}$          |
| 7           | 320,4             | -85,0              | 70,0                                      | $K^{\sigma^?}$          |

#### 5.4.2 Abgestrahlte Schalleistung einer Schalenstruktur

Nachdem die Bewertung von Schwingformen an einer rechteckigen Doppelglasfensterscheibe (DGF) skizziert wurde, erfolgt nun eine Anwendung an einer gekrümmten Schalenstruktur, die mit einem Shaker angeregt wird. Die Geometrie der untersuchten Schale entspricht weitgehend der Geometrie, die in Abbildung 5-17 bemaßt dargestellt ist. Zusätzlich zur beschriebenen Geometrie verfügt die Schale über einen 20 mm breiten Rand mit Bohrungen, um die Schale in einem Spannrahmen montieren zu können.

Die Anregungsstelle befindet sich auf einem Abschnitt der Schale, der nur eine sehr geringe Krümmung aufweist, damit eine spannungsfreie Anbindung des Shakers sowie eine weitgehend oberflächennormale Anregung möglich sind. Der Spannrahmen, in den die Schale gespannt wird, ist wiederum mit einem quaderförmigen Gehäuse aus 20 mm dickem Plexiglas verschraubt, welches einen abnehmbaren Boden hat, der während der Untersuchungen nicht montiert ist. Die Schale schwingt folglich nicht gegen ein akustisch wirksames Volumen. Das

Gehäuse verfügt weiterhin über eine Aufnahme, welche die Befestigung eines Shakers mit Gummibändern im Inneren des Gehäuses erlaubt. Am Ort der Anregung ist der Shaker über einen Impedanz-Messkopf an die Schale angekoppelt. Der Aufbau ist in Abbildung 5-25 dargestellt. Ebenfalls in Abbildung 5-25 dargestellt ist der zweiteilige Aufbau des Spannrahmens (Oberteil und Unterteil), in dem mit zwei Elastomerdichtungen die Schale montiert wird. Die beiden Rahmenteile werden mit Schrauben zusammengehalten, die gleichzeitig auch der Fixierung des Rahmens an dem Plexiglas-Gehäuse dienen. Der Spannrahmen wird gegenüber dem Plexiglas-Gehäuse ebenfalls mit einer Elastomerdichtung abgedichtet. Das Plexiglas-Gehäuse dient im vorliegenden Experiment ausschließlich als Halterung für den Spannrahmen und als Shakeraufnahme.

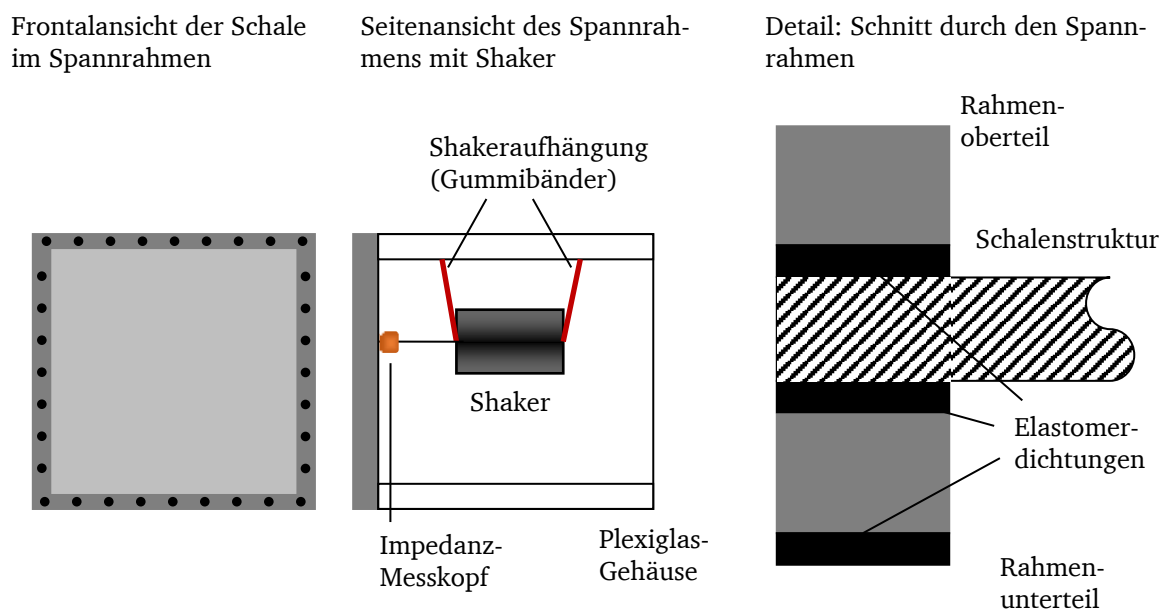


Abbildung 5-25: Einspannung der untersuchten Schalenstruktur im Spannrahmen und Detail der Einspannung im Spannrahmen (nicht maßstäblich)

Abbildung 5-26 zeigt die Frontalansicht der eingespannten Schale, wie sie experimentell vermessen wurde. Die in dieser Abbildung gezeigte Ansicht ist mit der in Abbildung 5-25 (links) dargestellten Ansicht vergleichbar. In Abbildung 5-26 ist zu erkennen, dass die Schale mit weißer Kreide eingesprüht wurde, um die Fokussierung des eingesetzten Scanning-Laservibrometers zu verbessern. Abbildung 5-27 zeigt die Schale im nicht eingespannten Zustand.

Ebenfalls deutlich erkennbar in Abbildung 5-27 ist auch, dass der Rand zur Einspannung der Schale nicht plan auf dem ebenen Untergrund aufliegt, was auf Eigenspannungen in der umgeformten Schale<sup>30</sup> zurückzuführen ist. Damit sind auch die Abweichungen im Eigenverhalten

<sup>30</sup> Die Schale wurde durch Innenhochdruckumformen aus einem Aluminiumblech im Rahmen eines gemeinsamen Projektes [182] am LOEWE-Zentrum AdRIA vom Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen hergestellt.

---

gegenüber den Ergebnissen, die in den Abschnitten 5.1 und 5.3 beschrieben werden, zu erklären.<sup>31</sup>

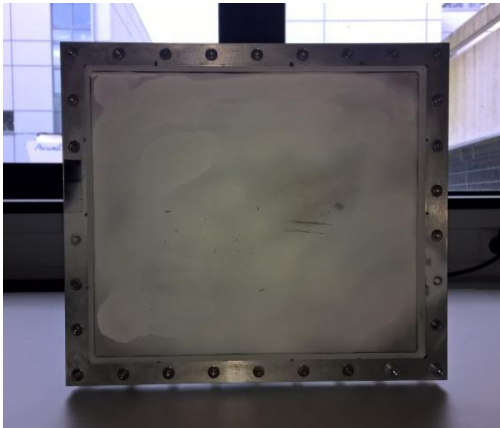


Abbildung 5-26: Schale in Spannrahmen

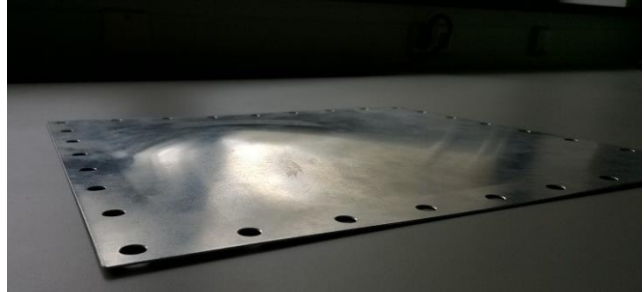


Abbildung 5-27: Gekrümmte Schale

Die Anregung der Schale erfolgte analog zu dem Szenario, welches in Abschnitt 5.4.1 dargestellt wurde. Als Anregungssignal wird ein Pseudozufallsrauschen (siehe u. a. [183]) verwendet, welches verstärkt und über den Shaker als Kraftanregung auf die Schale wirkt. Auch die Messung der Oberflächenschnelle sowie die Messung der Schallleistung erfolgt analog zu dem in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Vorgehen. Insgesamt werden 254 Messpunkte auf der Schalenoberfläche so verteilt, dass sich ein gleichmäßiges Gitter aus Messpunkten ergibt. Für die Messung der Oberflächenschnelle werden pro Messpunkt 4 Messungen mit einer Messdauer von jeweils 2 Sekunden durchgeführt, ausgewertet und gemittelt. Die gemessenen Zeitsignale werden mit einer Abtastrate von 48 kHz abgetastet und mit einem Hamming-Fenster gefenstert.

Die Messung der Schallleistung erfolgt auf die gleiche Weise wie im Fall der DGF mit einer pu-Sonde, wobei pro Messpunkt lediglich eine Messung, jedoch mit einer Messdauer von 4 Sekunden, durchgeführt wird. Aufgrund der geringeren Abmessung wird auch nur an 30 Positionen gemessen. Als Fenster wird ebenfalls ein Hamming-Fenster verwendet, die Abtastrate liegt bei 44,1 kHz. Eine Darstellung des verwendeten Messgitters findet sich im Anhang.

Ausgewertet werden die Messsignale im Frequenzbereich bis 1000 Hz. Gespeichert werden jeweils die Oberflächenschnelle der Schale für jeden Messpunkt sowie die Luftschallschnellen für alle drei Raumrichtungen und die Schalldrücke jedes untersuchten Messpunktes. In Abbildung 5-28 sind die gemessene mittlere quadratische Oberflächenschnelle sowie die abgestrahlte und gemessene Schallleistung in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt.

---

<sup>31</sup> Eine weitere Ursache für Abweichungen gegenüber den Simulationsergebnissen sind die realen Randbedingungen der Einspannung, die in den Simulationen nicht abgebildet werden.

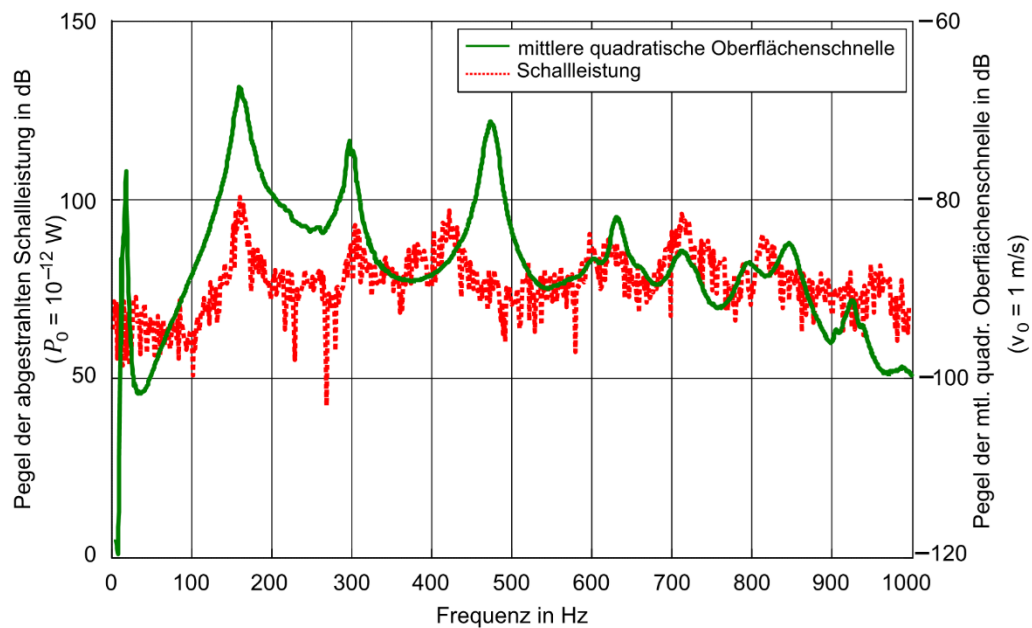


Abbildung 5-28: Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle und abgestrahlte Schallleistung<sup>32</sup> der in einem Spanrahmen montierten und mit einem Shaker angeregten Schalenstruktur

Im Frequenzbereich bis 1000 Hz befinden sich vier markante Peaks beim Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle. Der erste Peak liegt bei ca. 22 Hz und resultiert aus einem Schwingungszustand des Gesamtsystems aus Schale, Lagerung an der Einspannung sowie dem Shaker. Aufgrund der niedrigen Frequenz und der Dipolcharakteristik des in diesem Zustand schwingenden Systems ist die Schallabstrahlung ins Fernfeld vernachlässigbar klein. Der zweite Peak liegt bei einer Frequenz von ca. 160 Hz. Er ist betragsmäßig der höchste Peak und strahlt auch die höchste Schallleistung ab. Im Rahmen des üblichen Vorgehens wäre dieser Peak ein Ansatzpunkt, an dem man die Oberflächenschnelle reduzieren würde, wenn die Minderung der abgestrahlten Schallleistung das Ziel ist. Der dritte Peak und der vierte Peak der Oberflächenschnelle unterscheiden sich um nur ca. 1 dB und liegen 5 dB und 6 dB niedriger als der Peak mit der höchsten Schnelle. Die abgestrahlte Schallleistung der beiden Peaks unterscheidet sich jedoch um ca. 10 dB. Dieser Unterschied ist, auch für Experten, nicht vorhersehbar. Interessanterweise ist ein Peak der abgestrahlten Schallleistung verschoben. Er liegt zwischen dem dritten und vierten Peak der Oberflächenschnelle und korreliert demnach nicht mit einem Peak der Oberflächenschnelle. Außerdem fällt er betragsmäßig höher aus als die Schallleistung, die vom zu Peak drei gehörenden Schnellefeld abgestrahlt wird.

Bei einer Bewertung der Oberflächenschnelle würde man davon ausgehen, dass insbesondere die Schnellepeaks bei 160 Hz, 298 Hz und 474 Hz für die Schallabstrahlung maßgeblich sind. Tatsächlich aber sind nur die beiden Peaks bei 160 Hz und 298 Hz für die Schallabstrahlung

<sup>32</sup> Die kollozierten Messungen von Schalldruck und Schallschnelle erfolgen im Vergleich zur Messung an 120 Stellen im Fall der DGF (siehe Abschnitt 5.4.1) lediglich an 30 Messpunkten. Deshalb ist das Ergebnis der Schallleistungsmessung an der DGF aufgrund von mehr Mittelungen glatter als im Fall der Schalenstruktur.

relevant sowie eine Schwingform, die nicht mit einem relativen Maximum der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle korreliert.

Bezieht man in die Bewertung der Schnellepeaks die Schwingformen mit ein, ist alleine anhand der Anschauung keine zusätzliche Bewertung oder Prognose der abgestrahlten Schallleistung möglich. Die ersten vier Schwingformen, die lokalen Maxima der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle zugeordnet werden können, sind in Abbildung 5-29 dargestellt. Die Schwingformen sind dabei normiert dargestellt, um ihre Ausprägung bestmöglich zu visualisieren, wobei die Normierung anhand des jeweils maximalen Wertes (Betrag) im Schnellefeld erfolgt.

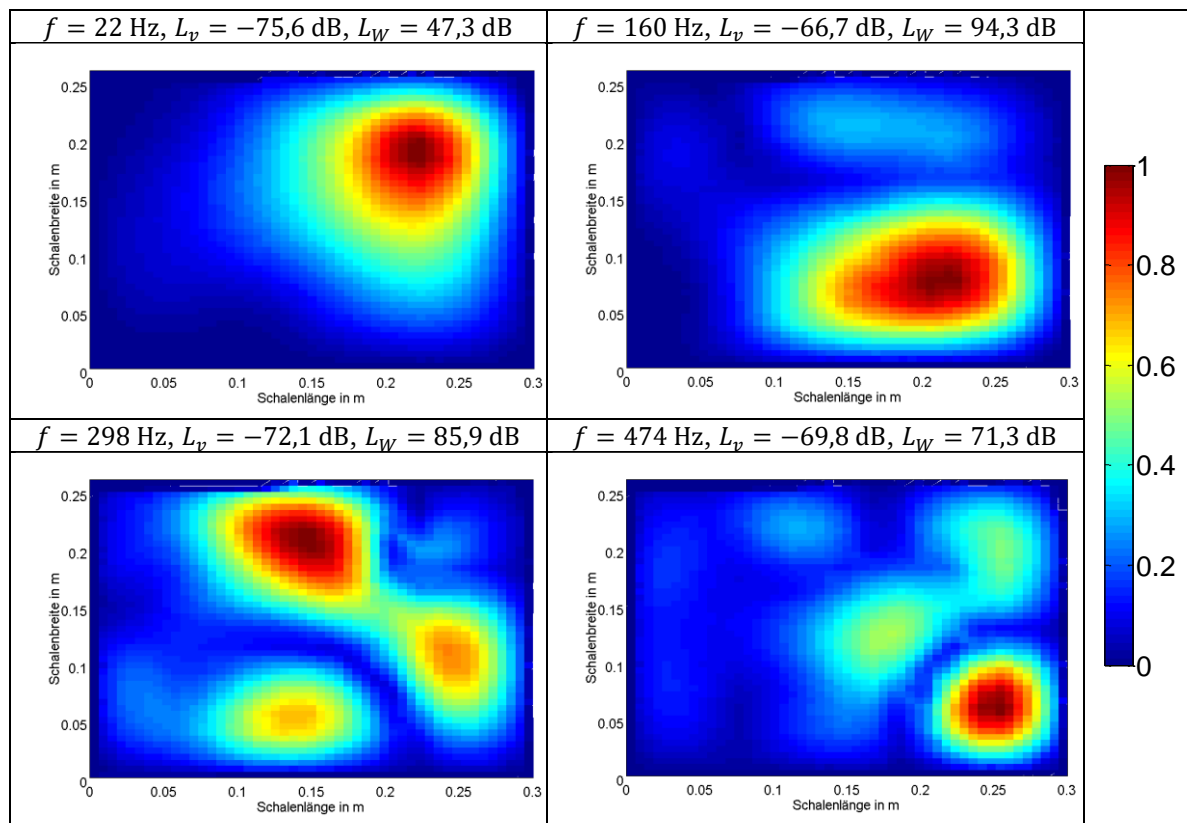


Abbildung 5-29: Normierte Schwingformen (mittlere quadratische Oberflächenschnelle) der Schalenstruktur mit Pegel der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle  $L_v$  und Schallleistungspegel  $L_W$

Klassifiziert man die Schwingformen mit dem bereits in den vorherigen Abschnitten beschriebenen KNN-Klassifikator, werden die vier Schwingformen wie folgt bewertet:

Die Schwingform bei  $f = 22 \text{ Hz}$  (Schwingform S1) wird als schwacher Strahler klassifiziert und die Schwingform bei  $f = 160 \text{ Hz}$  (Schwingform S2) wird als „starker Strahler“ klassifiziert. Als „unspezifiziert“ werden die Schwingformen bei  $f = 298 \text{ Hz}$  (Schwingform S3) sowie bei  $f = 474 \text{ Hz}$  (Schwingform S4) klassifiziert.

Folglich würde man im Rahmen von Maßnahmen zur Minderung der Schallleistung Schwingform S1 nicht weiter beachten und versuchen, die Strukturschwingungen der Schwingform S2 priorisiert zu reduzieren.

---

## 5.5 Ergebnisinterpretation

---

Es ist möglich, Schwingformen, die als Schnellefelder vorliegen, anhand ihrer geometrischen Ausprägung zu klassifizieren und im Hinblick auf ihre Neigung zur Schallabstrahlung zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prognose der abgestrahlten Schallleistung anhand der alleine wenig aussagekräftigen Bewertung der Oberflächenschnelle durch eine zusätzliche Bewertung mit Schwingformklassen verbessert werden kann. Die Klassen schwacher Strahler, starker Strahler sowie nicht genauer spezifizierbarer Strahler geben Aufschluss darüber, welche Schwingformen voraussichtlich besonders stark oder schwach Schall abstrahlen. Allerdings werden die meisten Schwingformen den Schwingformklassen zugeordnet, die keine näheren Informationen über das Abstrahlverhalten zulassen. Das hat mehrere Gründe. So ist die Datenbasis, die den Klassifikatoren zum Training dienen, nicht umfangreich genug. Für eine praktische Anwendung sind daher zusätzliche Trainingsdaten in Form von Simulations- oder Messdaten nötig. Außerdem stellt ein einfaches Verzerren des Eingangsgebietes auf eine andere Geometrie nur einen stark vereinfachten Ansatz dar, dessen Grenzen noch im Detail zu eruieren sind.

---

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

Im Rahmen der Arbeit wird die Bewertung von Schwingformen flächiger Strukturen hinsichtlich ihrer Neigung Schallleistung zu emittieren untersucht. Dazu wird, aufbauend auf dem Stand der Forschung und Technik, eine Fragestellung entwickelt, die mittels Data-Mining erörtert wird. Damit der Data-Mining-Prozess zur Beantwortung der Fragestellung durchlaufen werden kann, werden zunächst mit einer modifizierten Rechteckplatte numerische Experimente durchgeführt, deren Ergebnisse dann mittels zweier Klassifikationsverfahren klassifiziert und die Klassen analysiert werden.

Die Klassen streuen in ihren Eigenschaften unterschiedlich stark und lassen teilweise Aussagen über die Eigenschaften enthaltener Schwingformen zu. Als eine wesentliche Eigenschaft zur Bewertung der abgestrahlten Schallleistung wird der Abstrahlgrad identifiziert und analysiert. Das ist dahingehend von Bedeutung, da dieser andernfalls nur durch komplexe Simulationen oder umfangreiche Messungen zugänglich gemacht werden kann. Die Klassen, die eine eindeutige Aussage über den Abstrahlgrad zulassen, ermöglichen nun die Identifikation von Schwingformen mit besonders starken oder schwachen Abstrahlgraden. Diese können verwendet werden, um Schnellefelder, aus denen die mittlere quadratische Oberflächenschnelle oder die ERP bestimmt werden, zusätzlich im Hinblick auf ihre Abstrahlungsneigung zu bewerten. In weiteren Schritten werden die Klassifikatoren auf Optimierungsprobleme sowie Mess- und Simulationsergebnisse angewandt.

---

### 6.1 Diskussion wesentlicher Ergebnisse

---

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich anhand der in Abschnitt 2.5 aufgeworfenen Forschungsfragen diskutieren. Die erste Forschungsfrage, ob sich allgemeingültige Metriken zur Charakterisierung der abgestrahlten Schallleistung aus Schwingformen ableiten lassen, kann prinzipiell bejaht werden. Bereits in der Literatur sind Schwingformen bestimmter geometrischer Ausprägungen bekannt, die zu einer besonders starken oder besonders schwachen Schallabstrahlung führen. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese einfachen geometrischen Formen um komplexere Formen erweitert. Insbesondere werden über den Literaturstand hinausgehend weitere Schwingformen als schwache oder starke Strahler anhand ihrer geometrischen Ausprägung für Experten bewertbar. Diese Schwingformen sind den bereits als schwache oder starke Strahler bekannten Schwingformen entweder sehr ähnlich oder aber algorithmisch bewertbar.

Die zweite Forschungsfrage zielt auf zweckmäßige Größen oder Auslegungsziele ab, die bei flächigen Strukturen angewandt werden sollen, wenn die abgestrahlte Schallleistung möglichst minimal sein soll. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte im Wesentlichen die Bewertung der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle, die direkt proportional zur in der industriellen Praxis häufig verwendeten ERP ist, mit Abstrahlgradklassen als Lösungsansatz abgeleitet



---

werden. Dazu wird, ausgehend von der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle als Bewertungsbasis, ein Entscheidungsbaum durchlaufen, an dessen Ausgängen drei diskrete Informationszustände vorliegen. Die Informationszustände lauten entweder *Schwingform kritisch*, *Schwingform unspezifiziert* oder *Schwingform unkritisch*. Damit liegt eine Empfehlung vor, welche Schwingformen bei der Durchführung von Maßnahmen zur Minderung der abgestrahlten Schallleistung berücksichtigt werden müssen. Allerdings müssen bei einer konservativen Herangehensweise, die bei Lärminderungsmaßnahmen zu empfehlen ist, auch diejenigen Schwingformen mit Maßnahmen belegt werden, die als *unspezifiziert* klassifiziert werden. Folglich liegt die größte Herausforderung in einer möglichst sicheren Klassifikation der Schwingformen in eine kritische oder unkritische Klasse. Insgesamt kann die Prognosesicherheit der abgestrahlten Schallleistung unter Verwendung der mittleren quadratischen Oberflächenschnelle oder der ERP unter Verwendung der Klassifikation deutlich verbessert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt die praktische Erprobung der Bewertung anhand von Mess- und Simulationsergebnissen. Dabei wurde deutlich, dass in einigen Fällen, trotz teils sehr ähnlicher Geometrie, die entstehenden Schnellefelder zur Klassifizierung *Schwingform unspezifiziert* führen. Der Erkenntnisgewinn ist in diesen Fällen geringer als bei einer eindeutig *kritischen* oder *unkritischen* Klassifizierung. Dennoch können bei der Optimierung sowie der Auslegung eines shunt damping durch die Verwendung der Abstrahlgradklassen als Bewertungsgrößen bessere Ergebnisse erzielt werden als bei einer Herangehensweise, die ausschließlich die Oberflächenschnelle berücksichtigt. Insbesondere bei der akustischen Strukturoptimierung ist die Bewertung von Schnellefeldern ein lohnenswerter Ansatz. Zwar wird im untersuchten Beispiel die Optimierungsprozedur um fast 10 % verlängert, vergleicht man aber die nötige Rechenzeit mit dem Zeitbedarf, der bei einer vollständigen Simulation der abgestrahlten Schallleistung nötig wäre, liegt die Zeitersparnis pro Simulationsaufruf demgegenüber bei rund 50 %. Insbesondere im frühen Entwicklungsstadium ist das vorteilhaft. Darüber hinaus ermöglicht die Bewertung der Schnellefelder eine bessere Prognose der abgestrahlten Schallleistung auch dann, wenn keine Werkzeuge zur Berechnung der abgestrahlten Schallleistung vorliegen. Das ist in der industriellen Praxis durchaus von Bedeutung, da entweder Zeit oder Software-Lizenzen oder beides eingespart werden können.

Abschließend kann die Methode des Data-Mining zum Erkennen von Mustern und zur Ableitung von Regeln, welche die Bewertung der abgestrahlten Schallleistung möglich machen, als geeignet eingestuft werden. Der CRISP-DM liefert unter Verwendung von Klassifikationsverfahren in der Simulationsphase Informationen in Form von Bewertungsklassen, die den Abstrahlgrad von Schwingformen ohne komplexe Abstrahlungsrechnung zugänglich machen. Auch dann, wenn die Klassifikationsverfahren und insbesondere die Klassifikatoren im Schritt der Simulation noch keine optimalen Ergebnisse liefern, muss dies unter Berücksichtigung der Datenbasis und des einfachen Testdatensatzes relativiert werden. Da bereits die geringe Datenbasis zu positiven Ergebnissen führt, ist davon auszugehen, dass eine umfangreichere Datenbasis



---

zum Training der Klassifikatoren auch die Klassifikationsergebnisse und damit die Prognosegüte erhöht.

---

## 6.2 Ausblick

---

Eine Ableitung von konkreten Expertenregeln kann ohne weitere Forschung nicht erfolgen. Anstelle der abstrakten Abstrahlgradklasse *unspezifiziert* ist eine darüberhinausgehende Unterscheidung sinnvoll. Dabei ist insbesondere von Interesse, ob es sich um eine Schwingform handelt, die weder besonders stark, noch besonders schwach Schall abstrahlt, oder aber um eine Schwingform, über die noch keine Informationen hinsichtlich ihres Abstrahlgrades vorliegen. Dazu müssen umfangreiche Datensätze geschaffen werden, die sowohl Schwingforminformationen als auch die abgestrahlte Schallleistung enthalten. Sinnvoll ist hier ein Vorgehen, welches die Schallabstrahlung auf der Basis von Simulationsdaten generischer Strukturen (Platten, Quader etc.) zugrunde legt. Der Vorteil von derartigen Strukturen ist, dass sich Schnellefelder komplexerer Geometrien (Maschinengehäuse etc.) auf einfache Geometrien projizieren lassen. Derartige Ansätze werden auch von numerischen Simulationsmethoden verfolgt, um z. B. die Ergebnisse einer fein vernetzten Struktursimulation mit einem gröberen Gitter eines akustischen Simulationsmodells zu koppeln (Mesh Mapping). Auf diese Weise würden die Klassifikationsergebnisse auch nahezu beliebig generalisierbar.

Die algorithmische Bewertung anhand von Schwingformklassen stellt für sich alleine einen Ansatz dar, der im Kontext der zunehmend an Bedeutung gewinnenden intelligenten Systeme (künstliche Intelligenzen) von Interesse ist. So kann der in Abbildung 4-26 skizzierte Prozess selbstlernend als Teilprozess eines *künstlichen Akustikexperten* ausgestaltet werden. Hierzu besteht jedoch erheblicher Forschungsbedarf, insbesondere die Datenkonditionierung betreffend, da diese typischerweise ungeordnet in unterschiedlichen Formen vorliegen und die Zuverlässigkeit dieser Daten auch häufig nicht gesichert ist.

Inwiefern die mittels Abstrahlgradklassen bewertete Oberflächenschnelle als Regelgröße angewendet werden kann, konnte im Rahmen der Arbeit nicht gezeigt werden und muss noch untersucht werden. Aufgrund der diskreten Klassen muss insbesondere eine Methodik entwickelt werden, um sprunghafte Reglerantworten, die zu Instabilitäten führen können, zu vermeiden. Regelungsansätze, die diskrete Sprünge berücksichtigen können, sind z. B. Fuzzy-Regler.

---

## Anhang

---

Nachfolgend sind Erläuterungen zu getroffenen Annahmen, Berechnungsvorschriften und das Anregungsszenario dargestellt. Darüber hinaus findet sich eine Beschreibung des verwendeten Optimierungsalgorithmus sowie eine Übersicht über die Testdatensätze.

---

### A. Erzeugung der Testdatensätze, Simulations- und Klassifikationsergebnisse

---

In diesem Abschnitt finden sich Details der Teststruktur, das Anregungsszenario sowie die Simulationsergebnisse. Auch die unterschiedlichen Klassifikationsergebnisse sind aufgeführt.

---

#### Teststruktur modifizierte Rechteckplatte

---

In Abschnitt 4.2.1.1 dieser Arbeit wird eine modifizierte Rechteckplatte eingeführt, die in einer numerischen Simulationsumgebung als FE-Modell implementiert ist. Diese Platte verfügt über einzeln fixierbare Knoten, um so das Strukturverhalten der Platte modifizieren zu können. Die Koordinaten dieser Knoten sind nachfolgend in Tabelle A-1 aufgeführt.

**Tabelle A-1: Koordinaten der fixierbaren Knoten  $K$**

| $K$ | $x_K$<br>in mm | $y_K$<br>in mm | $K$ | $x_K$<br>in mm | $y_K$<br>in mm |
|-----|----------------|----------------|-----|----------------|----------------|
| 1   | 30             | 10             | 14  | 120            | 70             |
| 2   | 60             | 10             | 15  | 150            | 70             |
| 3   | 90             | 10             | 16  | 30             | 100            |
| 4   | 120            | 10             | 17  | 60             | 100            |
| 5   | 150            | 10             | 18  | 90             | 100            |
| 6   | 30             | 40             | 19  | 120            | 100            |
| 7   | 60             | 40             | 20  | 150            | 100            |
| 8   | 90             | 40             | 21  | 30             | 130            |
| 9   | 120            | 40             | 22  | 60             | 130            |
| 10  | 150            | 40             | 23  | 90             | 130            |
| 11  | 30             | 70             | 24  | 120            | 130            |
| 12  | 60             | 70             | 25  | 150            | 130            |
| 13  | 90             | 70             |     |                |                |

Ebenfalls in Abschnitt 4.2.1.1 werden die verwendeten Materialparameter eingeführt. Die Implementierung der Plattengeometrie als FE-Modell erfolgt mit der Finite-Elemente-Software ANSYS. Im FE-Modell ist die Platte mittels Schalenelementen vom Typ `Shell 93` abgebildet. Dabei handelt es sich um ein Schalenelement mit 8 Knoten und quadratischen Ansatzfunktionen.

Das Anregungsszenario, welches der Erzeugung der Testdatensätze mit Hilfe der modifizierten Rechteckplatte dient, ist in Abbildung A-1 dargestellt.

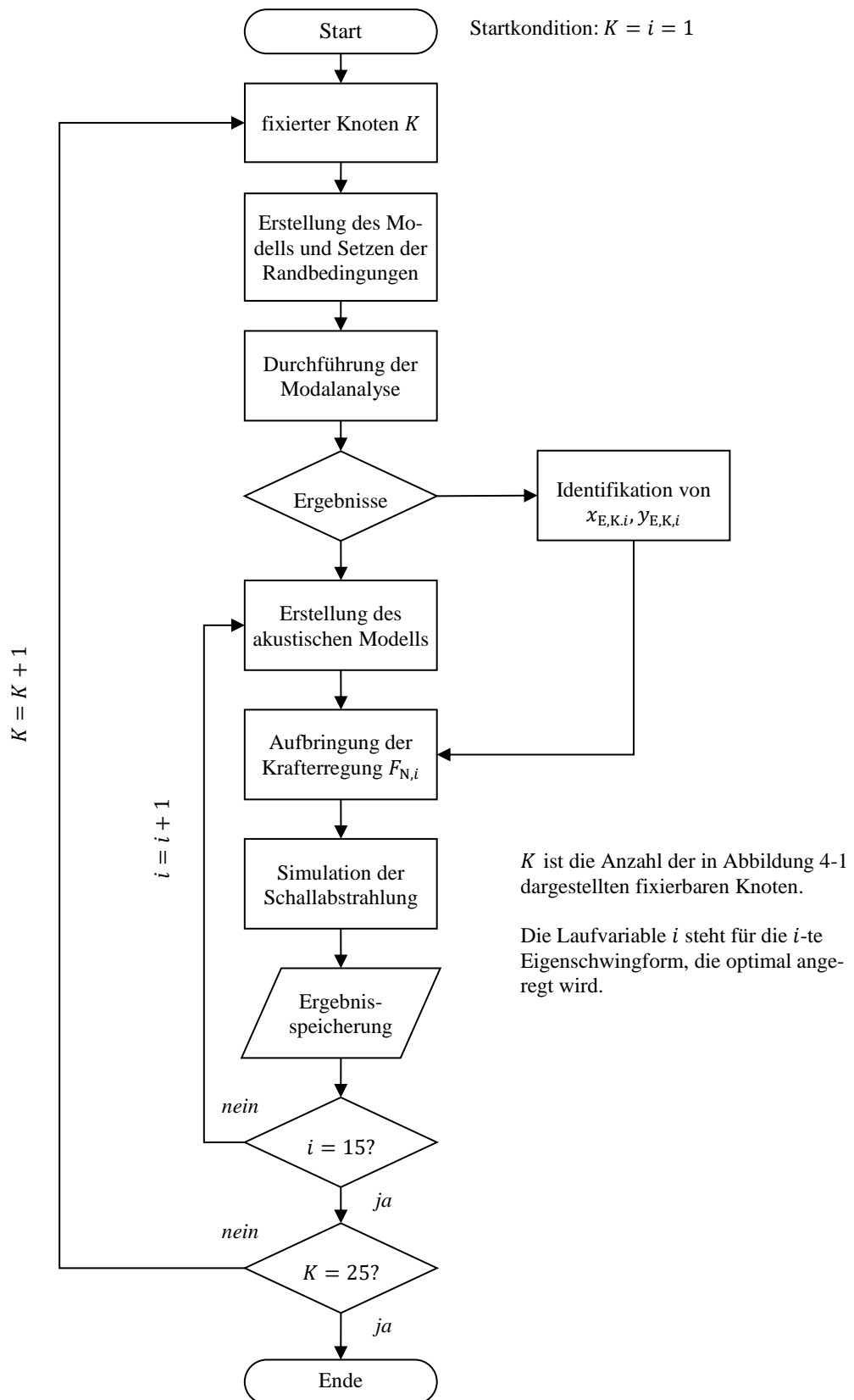


Abbildung A-1: Schema des Anregungsszenarios

---

## Ergebnisse der Klassifikation mittels SOM und *k*-Means-Algorithmus

---

Die Klassifikationsergebnisse für  $c = 25$  und  $c = 100$  finden sich in Abschnitt 4.3. Die Ergebnisse für  $c = 36$ ,  $c = 64$  und  $c = 81$  sind nachfolgend dargestellt.

### Klassifikationsergebnisse mittels KNN in Form einer SOM

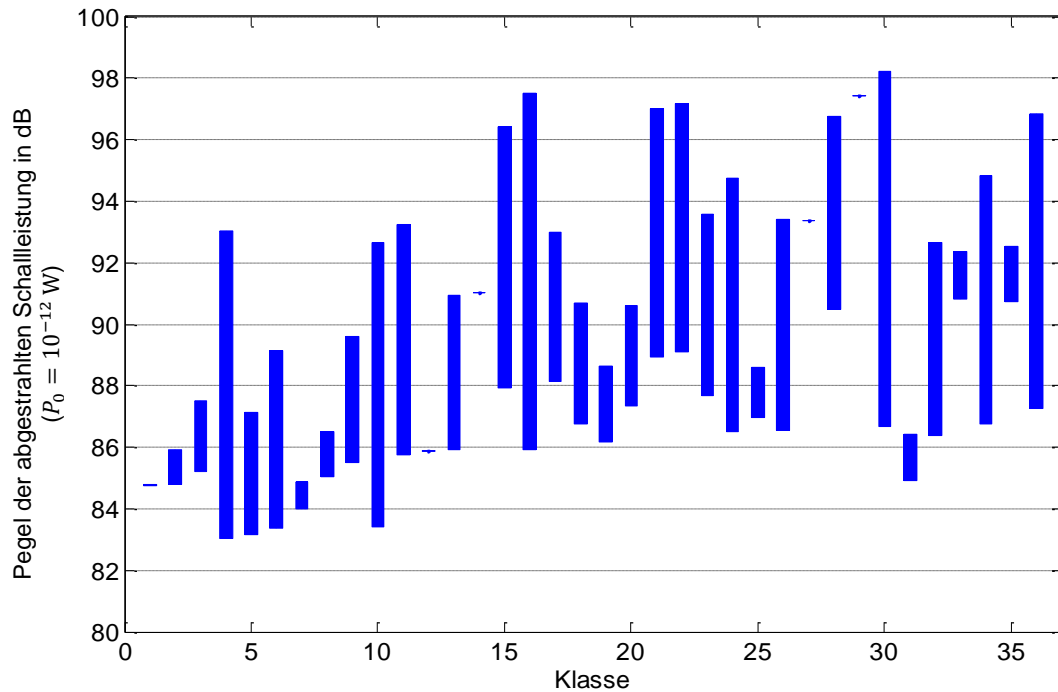


Abbildung A-2: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Schallleistungsklassen

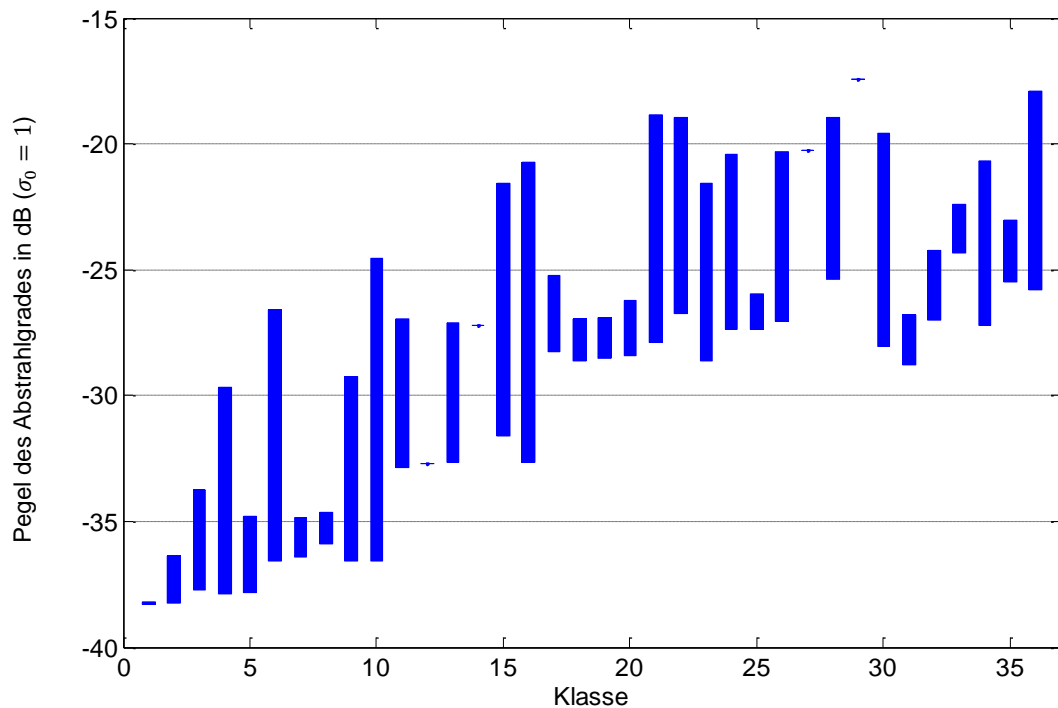


Abbildung A-3: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Abstrahlgradklassen

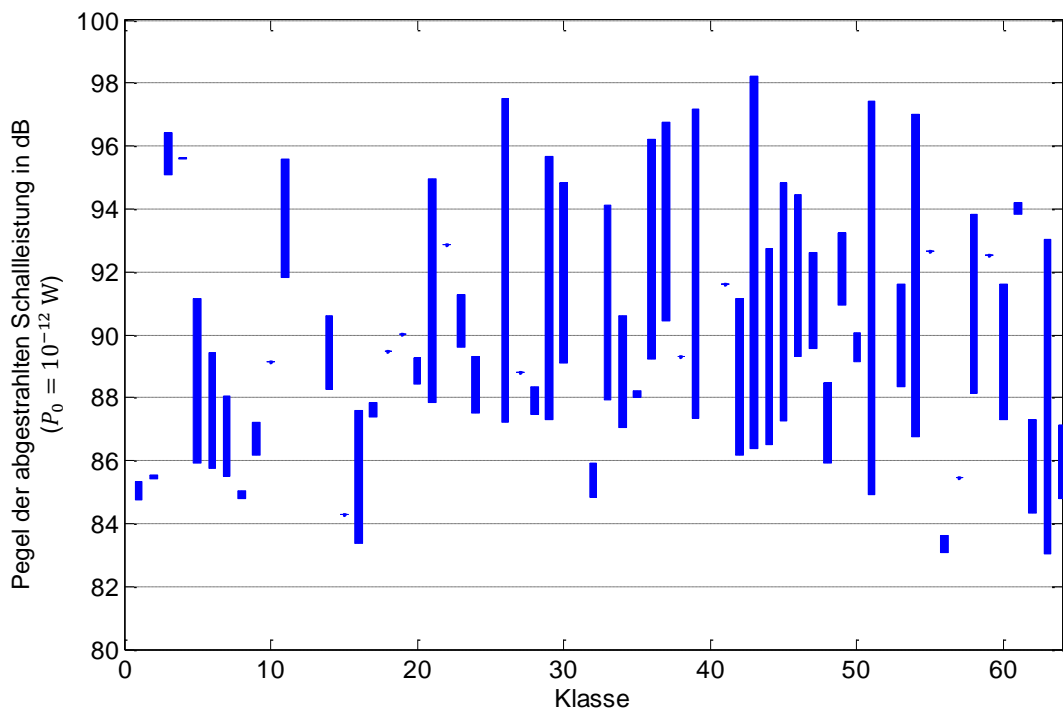


Abbildung A-4: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Schalleistungsklassen

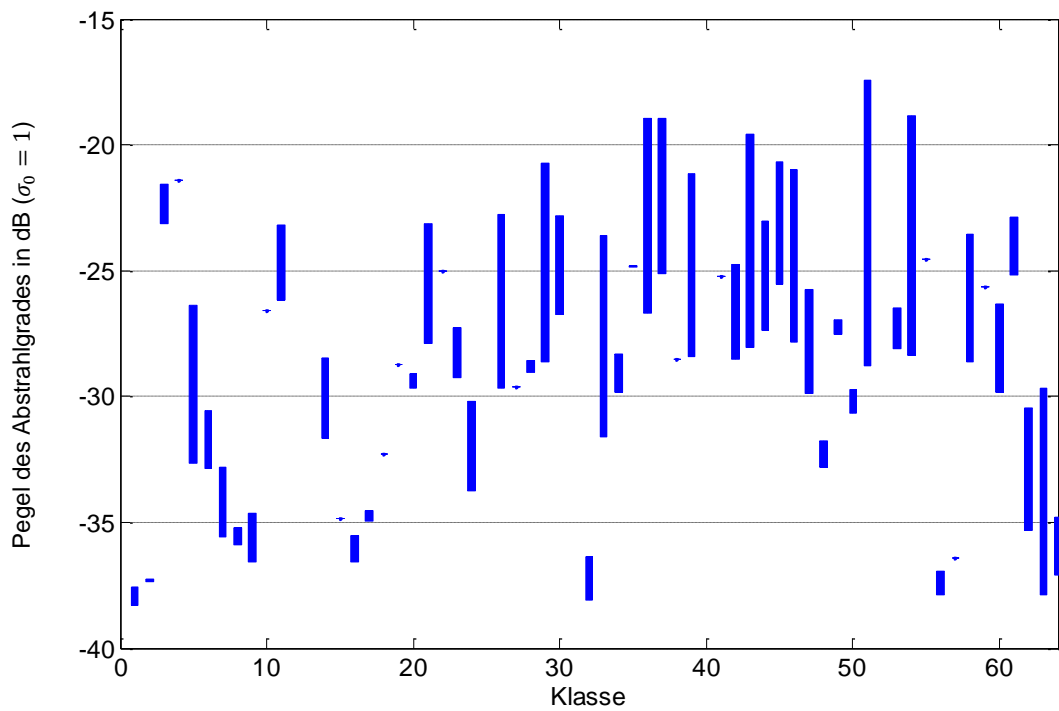


Abbildung A-5: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Abstrahlgradklassen

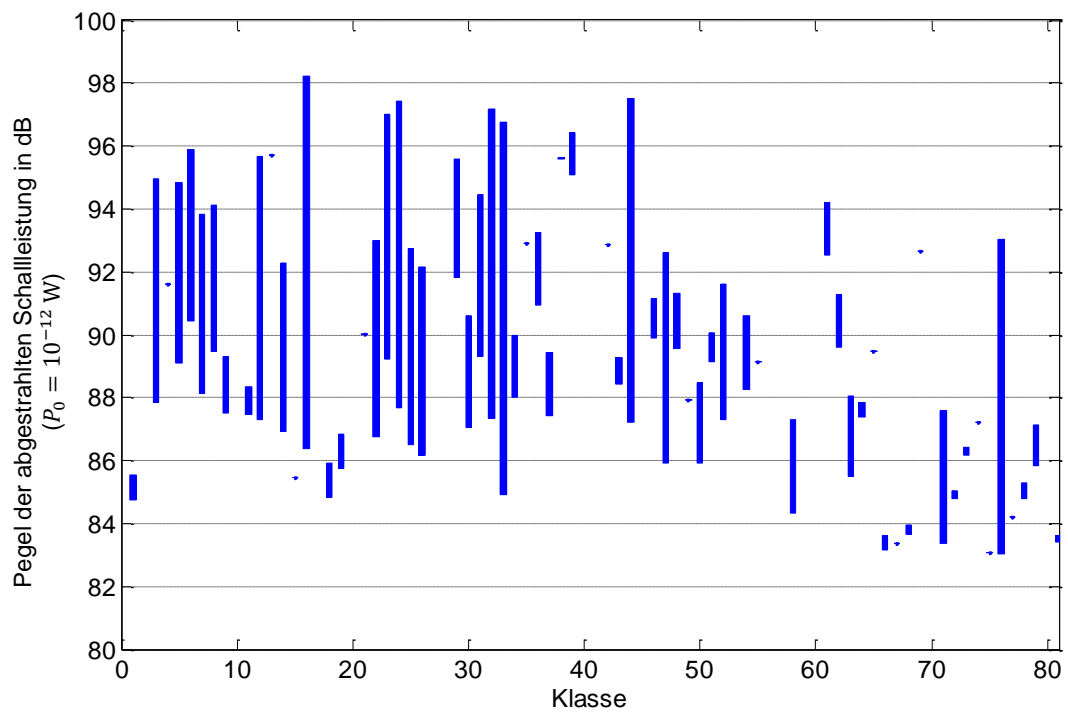


Abbildung A-6: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Schallleistungsklassen

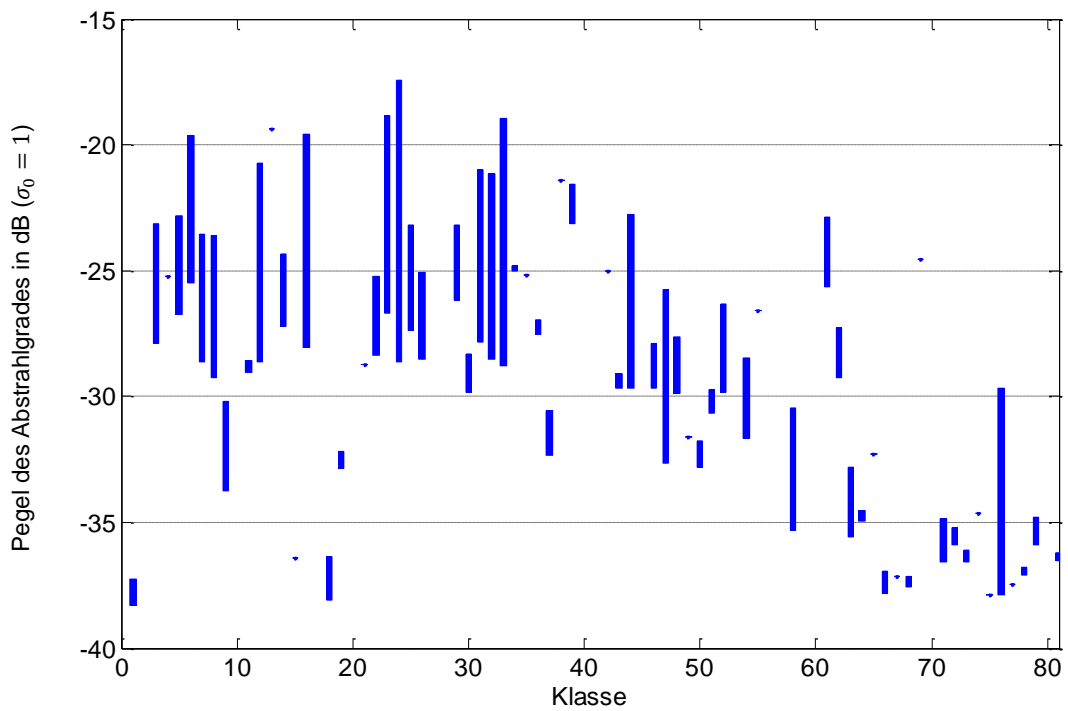


Abbildung A-7: Ergebnis der automatischen unüberwachten KNN-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Abstrahlgradklassen

## Klassifikationsergebnisse mittels $k$ -Means-Algorithmus

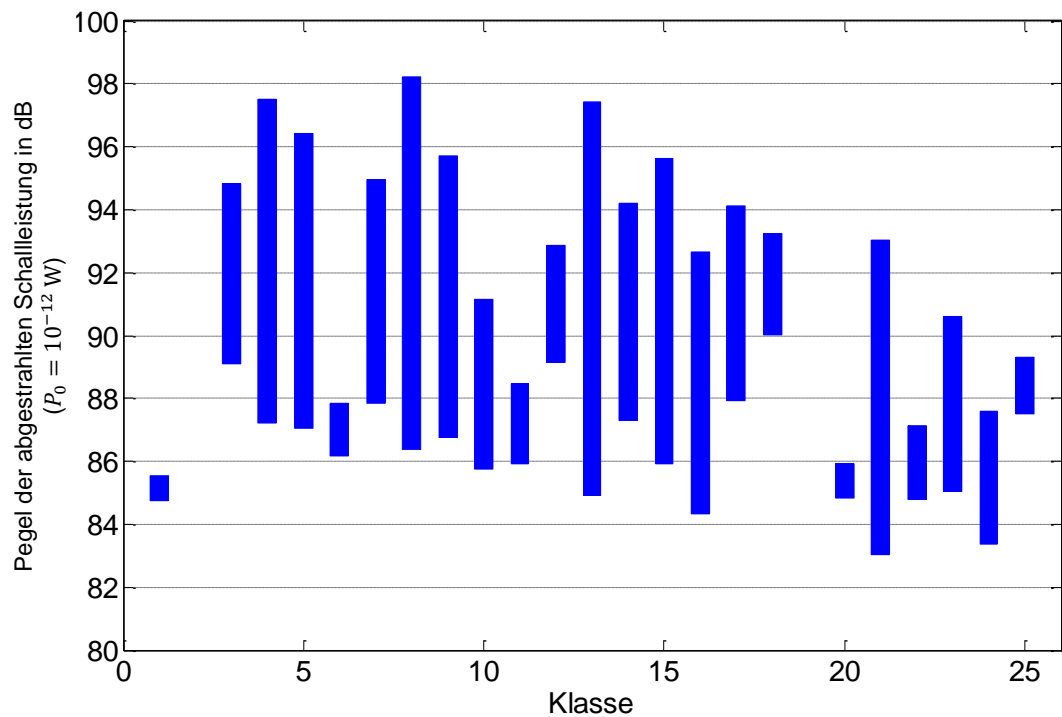


Abbildung A-8: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Schalleistungsklassen

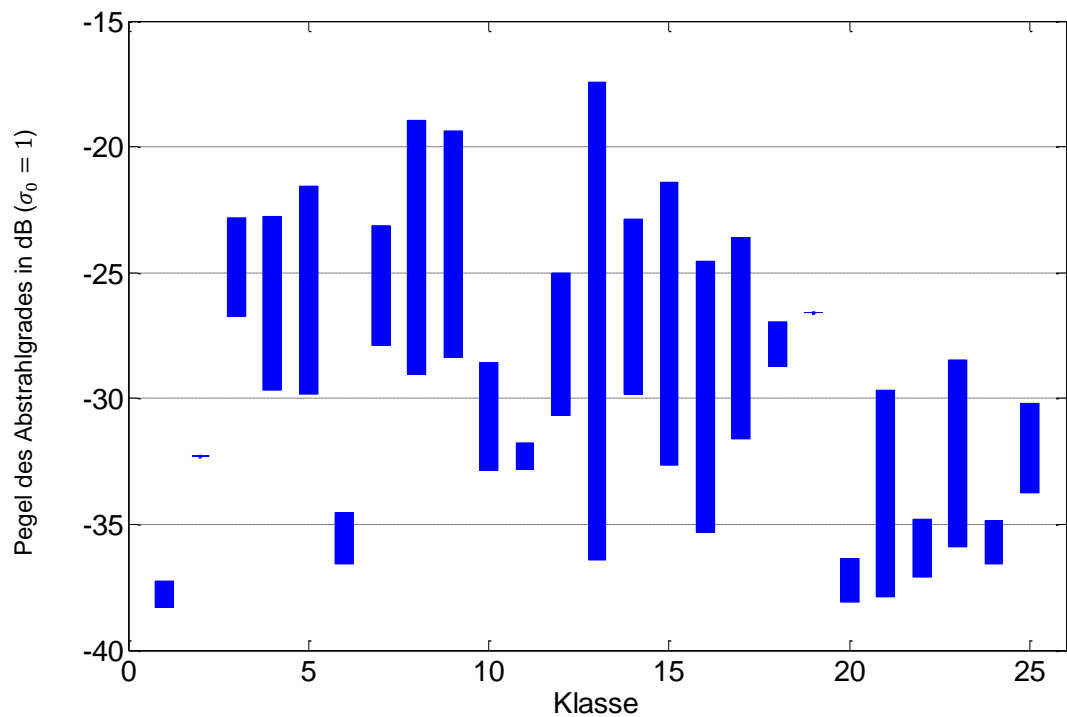


Abbildung A-9: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 36 möglichen Abstrahlgradklassen

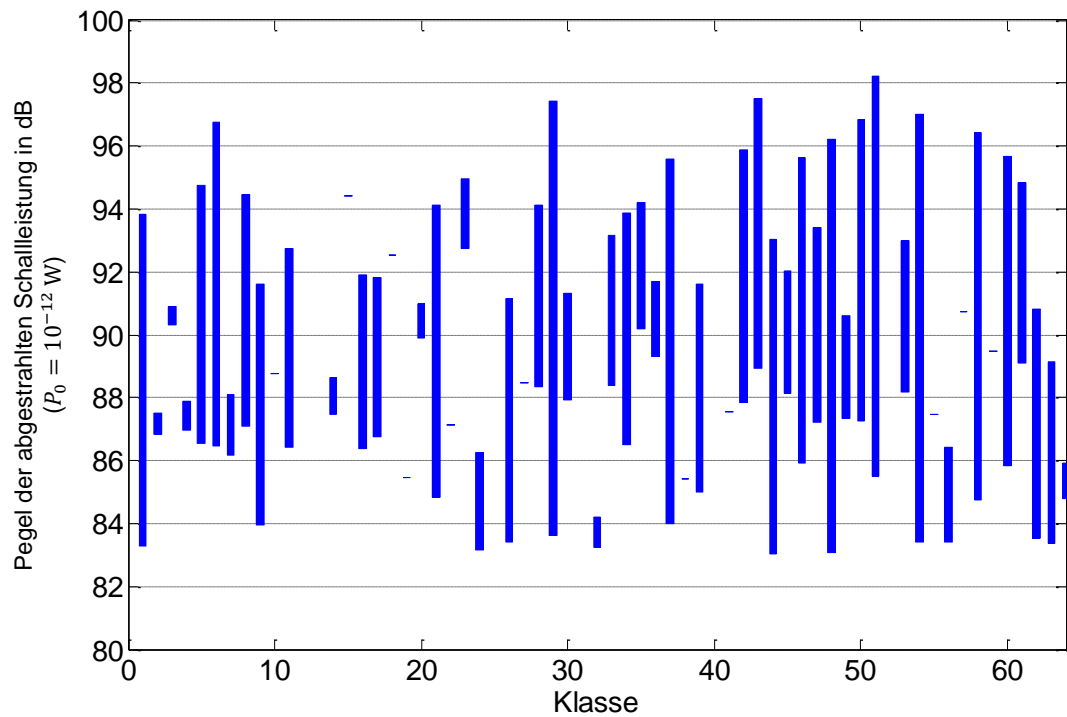


Abbildung A-10: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Schallleistungsklassen

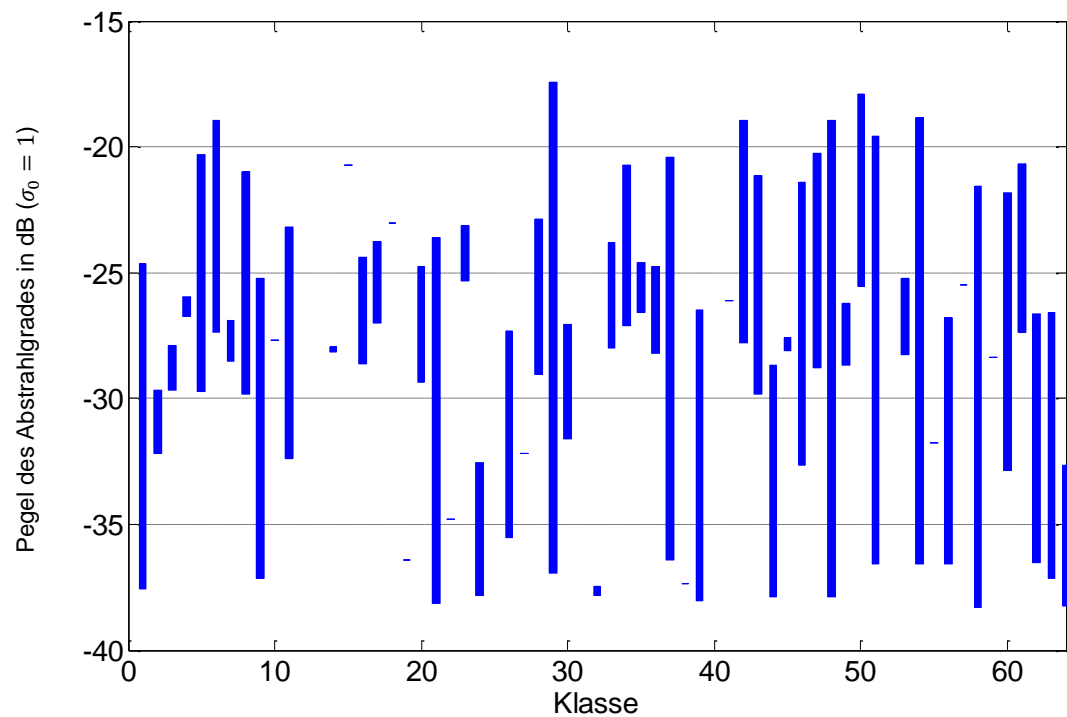


Abbildung A-11: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 64 möglichen Abstrahlgradklassen



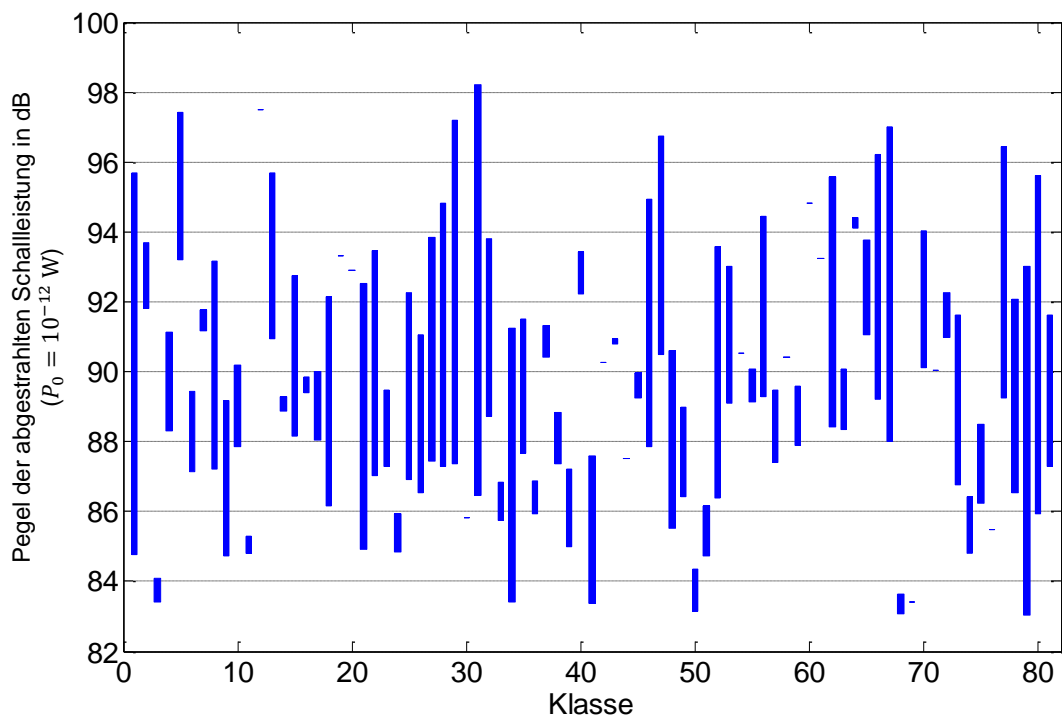


Abbildung A-12: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Schallleistungsklassen

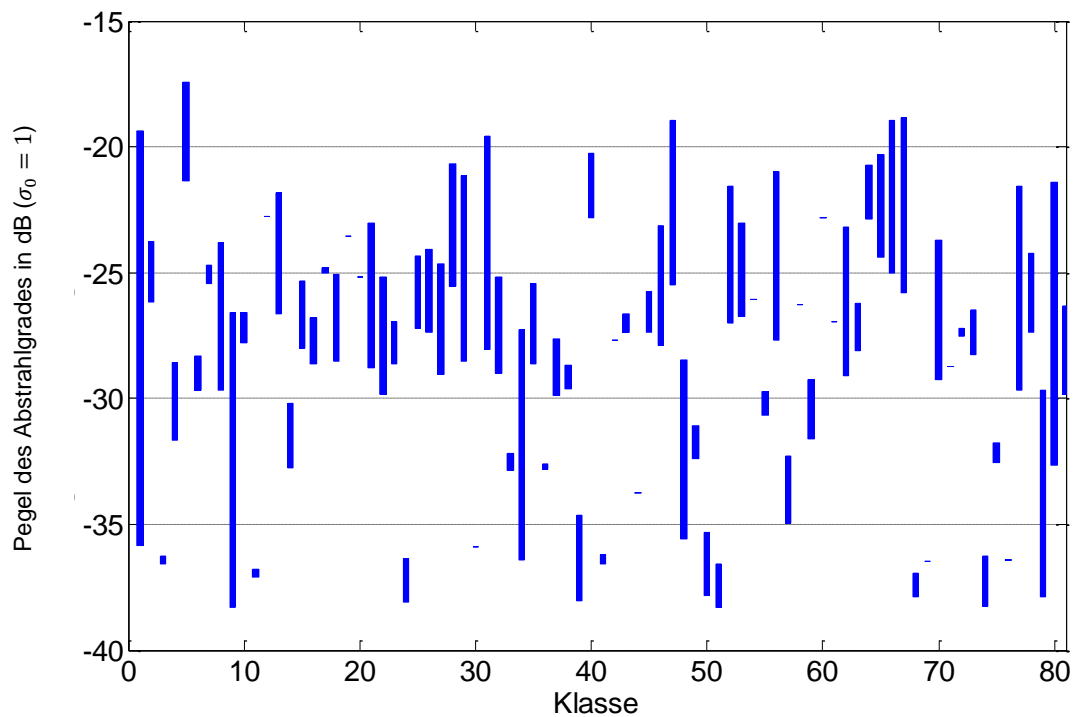


Abbildung A-13: Ergebnis der automatischen unüberwachten  $k$ -Means-Klassifizierung von Schnellefeldern mit 81 möglichen Abstrahlgradklassen

---

## B. Erläuterungen zum verwendeten Korrelationskoeffizienten

---

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Korrelationskoeffizienten  $r$  handelt es sich um den empirischen Korrelationskoeffizienten nach BRAVAIS und PEARSON [184]. Für den Korrelationskoeffizienten von  $n$  Realisationen (z. B. Messdaten oder Simulationsergebnisse) zweier Größen  $x$  und  $y$  gilt vereinfacht

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (\text{A-1})$$

wobei  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  jeweils für die empirischen Mittelwerte

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A-2})$$

und

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{A-3})$$

stehen. Die in der Arbeit angegebenen Korrelationskoeffizienten beziehen sich immer auf die entlogarithmierten Daten (z. B. Schallleistung statt Schallleistungspegel).

---

## C. Messtechnische Schallleistungsbestimmung

---

Die messtechnische Bestimmung der Schallleistung im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt indirekt anhand der gemessenen Schallintensität  $I$ . Integriert man die Schallintensität  $I$  über die schallabstrahlende Fläche  $S$ , erhält man die abgestrahlte Schallleistung  $P$  [179] (siehe auch Gleichung (4-28)). Die Messung der Schallintensität erfolgt mit einer pu-Sonde der Firma Microflown. Diese misst kollektiv den Schalldruck  $p$  sowie die Schallschnelle  $v$ , woraus sich die Schallintensität

$$I = pv \quad (\text{A-4})$$

am Ort des Messpunktes bestimmen lässt [179].

Zur praktischen Bestimmung der Schallleistung wird jedem Messpunkt, an dem die Schallintensität gemessen wird, eine Teilfläche  $S_i$  zugeordnet. Die Schallleistung ergibt sich dann aus der Summe der Teilflächen, die jeweils mit dem Vektor der Schallintensität  $I_i$ , welcher der Teilfläche zugeordnet wird, multipliziert werden. Das Vorgehen ist in [181] beschrieben.

$$P = \sum S_i I_i \quad (\text{A-5})$$

---

### Bestimmung der abgestrahlten Schallleistung der Doppelglasfensterscheibe

---

Bei der in Abschnitt 5.4.1 untersuchten DGF befinden sich die Messpunkte auf einem rechteckigen Raster, welches sich direkt über der Scheibe befindet. Die Messungen werden im Abstand von ca. 20 mm zur Fensterscheibe im Nahfeld mit einer Messdauer von  $t = 4$  s je Messpunkt durchgeführt.

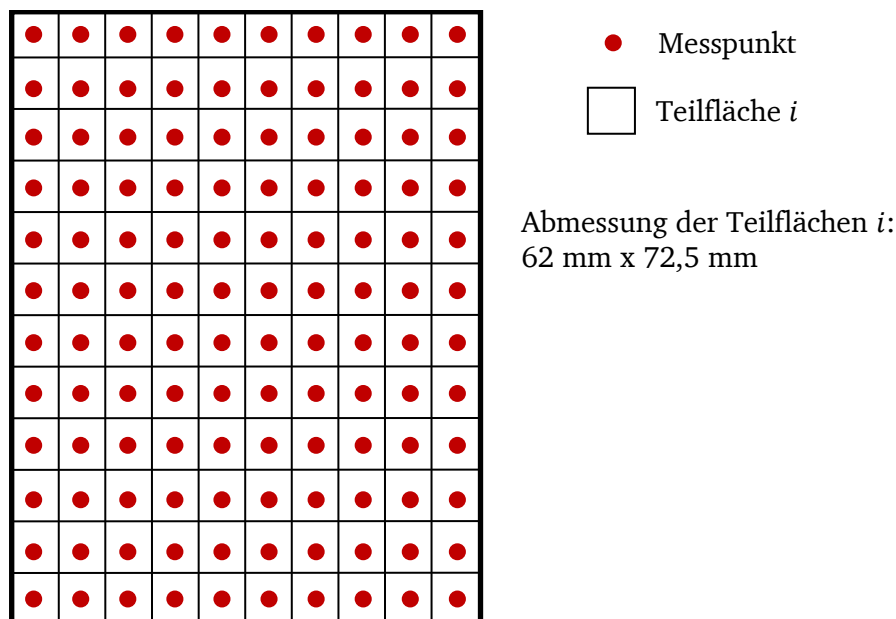


Abbildung A-14: Messpunkte der Schallintensitätsmessungen zur Schallleistungsbestimmung der DGF

---

## Bestimmung der abgestrahlten Schallleistung der gekrümmten Schale

---

Bei der in Abschnitt 5.4.2 untersuchten Schalenstruktur befinden sich die Messpunkte auf einem rechteckigen Raster, welches sich direkt über der Schale befindet. Die Messungen werden im Abstand von ca. 20 mm zur Einspannungsebene der Schale durchgeführt. Je Messpunkt erfolgt eine Messung mit einer Messdauer von  $t = 4$  s.

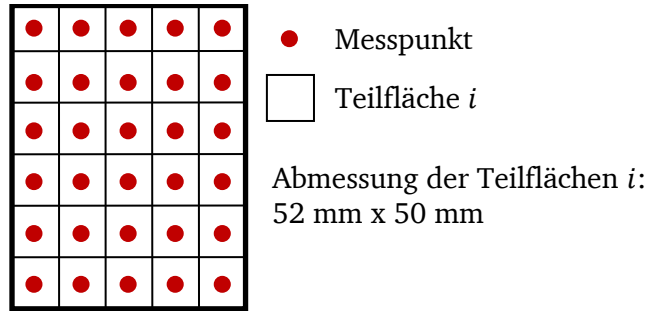


Abbildung A-15: Messpunkte der Schallintensitätsmessungen zur Schallleistungsbestimmung der gekrümmten Schalenstruktur

---

## D. Verwendeter Optimierungsalgorithmus

---

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein adaptives Antwortflächenverfahren verwendet, welches die Zielfunktion global approximiert. Die Bestimmung des Optimums erfolgt dabei mittels Gradienteninformation. Der Suchraum wird im Laufe des Verfahrens sukzessive angepasst. Das hier verwendete Verfahren ist in der Software *OptiY* implementiert, aus dessen Programmhilfe [185] sowie [57] die nachfolgenden Details entnommen sind. Zunächst soll die Behandlung der Restriktionen erklärt werden. In *OptiY* werden die Restriktionen direkt und zuerst berücksichtigt. Das heißt, dass der Algorithmus zunächst prüft, ob die Werte der Designvariablen im zulässigen Bereich liegen, bevor eine Simulation durchgeführt wird. Liegt ein Wert nicht im zulässigen Bereich, wird ein neuer Satz Designvariablen generiert.

Wird eine Größe, die selbst Ergebnis der Simulation ist, als Restriktion verwendet, erfolgt die Überprüfung, ob sich ihr Wert im zulässigen Wertebereich befindet, im Anschluss an die Simulation. Der Wert der Zielfunktion wird dabei jedoch trotzdem zur Approximation der Zielfunktion verwendet.

Die Approximation der Zielfunktion  $\tilde{y}(\mathbf{x})$  erfolgt mit einem Polynom 2. Ordnung

$$\tilde{y}(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq i}^n a_{ij} x_i x_j. \quad (\text{A-6})$$

Dabei stehen  $n$  für die Anzahl der Designvariablen und  $a_i$  sowie  $a_{ij}$  für die zu bestimmenden Koeffizienten des Polynoms. Im hier verwendeten Fall wird jedoch keine einfache, sondern eine

glättende Interpolation durchgeführt. Die Glättung erfolgt mittels der Methode der kleinsten Quadrate. Dabei dient die Summe der Quadrate der Approximationsfehler  $R$  mit

$$R = \sum_{j=1}^m r_j^2 \quad (\text{A-7})$$

als Kriterium zur Beurteilung der besten Glättung.  $m$  steht darin für die Anzahl der benötigten Gleichungen (siehe A-13) und  $r_j^2$  für das jeweilige Quadrat der Abweichung eines approximierten Funktionswertes  $\tilde{y}_j$  von einem tatsächlichen Funktionswert der Zielfunktion  $y_j$  an einer Stelle, an der die Zielfunktion ausgewertet wird.

$$r_j = y_j - \tilde{y}_j \quad (\text{A-8})$$

Es empfiehlt sich, Gleichung (A-8) in der Form

$$r_j = y_j - \sum_{k=1}^m \hat{a}_k \mathbf{X}_{kj} \quad (\text{A-9})$$

zu schreiben, wobei die Matrix  $\mathbf{X}_{kj}$  die spaltenweise zur Stützstelle  $j$  gehörenden Vektoren der Designvariablen  $\mathbf{x}_j$  enthält

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_m). \quad (\text{A-10})$$

$\mathbf{x}_j$  hat die Form

$$\mathbf{x}_j^T = (1, x_1, x_2, \dots, x_n, x_1 x_2, \dots, x_1 x_n, x_2 x_3, \dots, x_2 x_n, \dots, x_{n-1} x_n, x_n^2 x_{n-1}^2, x_n^2 x_{n-2}^2, \dots, x_n^2 x_1^2, x_n^2, x_{n-1}^2, \dots, x_1^2) \quad (\text{A-11})$$

und  $\hat{\mathbf{a}}$  mit den Koeffizienten des Polynoms

$$\hat{\mathbf{a}}^T = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, a_{22}, a_{23}, \dots, a_{2n}, \dots, a_{(n-1)n}, a_{nn}) \quad (\text{A-12})$$

Im Fall eines Polynoms 2. Ordnung ergibt sich die Zahl  $m$  in (A-7) und (A-9) nach [185]

$$m = \frac{(n^2 - n)}{2} + 2n \quad (\text{A-13})$$

und stellt die Anzahl der Simulationen dar, die zur Glättung der Approximation pro Iterationsschritt nötig sind. Die Approximation ist dann im Sinne des Glättungskriteriums optimal angepasst, wenn das Optimierungsproblem

$$\min \left( R = \sum_{j=1}^m r_j^2 = \sum_{j=1}^m \left( y_j - \sum_{k=1}^m \hat{a}_k \mathbf{X}_{kj} \right)^2 \right) \quad (\text{A-14})$$

gelöst wird, wenn die Ableitungen verschwinden

$$\frac{\partial R}{\partial x_i} = 0. \quad (\text{A-15})$$

Damit erhält man die Berechnungsvorschrift für die Koeffizienten zu

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (\text{A-16})$$

Darin ist  $\mathbf{a}$  der Vektor der Approximationskoeffizienten und  $\mathbf{y}$  der Vektor mit den Funktionswerten der Zielfunktion an den Stützstellen [185].

Die Stützstellen der Approximation werden mittels *Latin Hypercube Sampling* bestimmt. Der Startpunkt ist im ersten Iterationsschritt immer der Mittelpunkt des Suchraumes, der durch

$$\mathbf{x}_{\text{start}} = \begin{pmatrix} x_1^{\text{start}} \\ \vdots \\ x_n^{\text{start}} \end{pmatrix} \quad (\text{A-17})$$

beschrieben wird, wobei die Mittelpunkte des Suchraumes bezüglich der einzelnen Designvariablen als Mittelpunkt zwischen oberer  $x_i^{(o)}$  und unterer Grenze  $x_i^{(u)}$  definiert sind.

$$x_i^{\text{start}} = \frac{1}{2} (x_i^{(o)} - x_i^{(u)}) \quad (\text{A-18})$$

Beim *Latin Hypercube Sampling* handelt es sich um eine Simulation zur gleichmäßigen Generierung von Punkten innerhalb eines mehrdimensionalen Raumes. Hier dient es zur Erzeugung von gleichmäßig verteilten Stützpunkten innerhalb des Designraumes um die jeweils ermittelten Optima. Dabei wird jeder Wertebereich einer der  $n$  Designvariablen in  $M$  Intervalle gleicher Wahrscheinlichkeit eingeteilt. D. h. der Wertebereich einer Designvariablen wird mit einer Normalverteilung beaufschlagt. Ein Intervall gleicher Wahrscheinlichkeit liegt genau dann vor, wenn die Flächen unter der Verteilungsdichte intervallweise gleich groß sind. Anschließend wird von einem Zufallsgenerator entsprechend der Verteilungsfunktion für jedes Intervall eine Menge von Zufallszahlen erzeugt. Dann werden entsprechend der Anzahl der Intervalle, die gleichzeitig die Anzahl der nötigen Stützstellen darstellen, die Stützpunkte zufällig verteilt.

Ist die Simulation an allen Stützstellen abgeschlossen und die erste Antwortfläche erzeugt, wird das Optimum der ersten Approximation ermittelt. Die Ermittlung der Sensitivitäten erfolgt effizient, da das Polynom der Approximation allgemein in Form von (A-6) und die zugehörigen Ableitungen mit

$$\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_i} = a_i + \sum_{j=1}^n \sum_{j \geq i}^n a_{ij} x_j + 2a_{ii} x_i \quad (\text{A-19})$$

für die erste Ableitung nach der Designvariablen  $x_i$  und

$$\frac{\partial^2 \tilde{y}}{\partial x_i^2} = 2a_{ii} \quad (\text{A-20})$$

für die zweite Ableitung formal hinterlegt sind. Wenn also die Koeffizienten des Polynoms bekannt sind, liegt damit auch das Metamodell der Ableitungen vor.

Das Optimum  $\mathbf{x}_k$  der Approximation eines Iterationsschrittes  $k$  muss als virtuelles Optimum gesehen werden, da die Zielfunktion am ermittelten Punkt höchstwahrscheinlich nicht von Anfang an mit dem Wert der Approximation übereinstimmt. Nun muss überprüft werden, wo  $\mathbf{x}_k$  liegt, um das weitere Vorgehen festzulegen. Liegt  $\mathbf{x}_k$  auf dem Rand des Suchbereiches, so wird der Suchbereich um  $\mathbf{d}$  verschoben, auch wenn dadurch ein Bereich außerhalb des zulässigen Bereiches mitberücksichtigt wird. Dieser unzulässige Bereich dient in diesem Fall nur zur Erzeugung der Approximation. Falls das Optimum der nächsten Iteration außerhalb des zulässigen Bereiches liegt, wird wieder zur Ausgangssituation gegangen und das Gebiet erneut approximiert.

Der Abstand  $\mathbf{d}$  des optimalen Punktes einer Approximation  $\mathbf{x}_k$  zum Startpunkt  $\mathbf{x}_{\text{start},k}$  der  $k$ -ten Iteration ergibt sich zu

$$\mathbf{d} = \mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{\text{start},k}. \quad (\text{A-21})$$

Befindet sich  $\mathbf{d}$  innerhalb des Suchbereiches, so wird der Suchbereich zusammengezogen. Dabei wird nach [57] standardmäßig der Suchraum der  $k$ -ten Iteration halbiert. Damit ergeben sich die neuen Grenzen des Suchbereiches zu

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{\text{u}(k+1)} &= \mathbf{x}^{\text{u}k} - \varphi^k \mathbf{r}^k \text{ und} \\ \mathbf{x}^{\text{o}(k+1)} &= \mathbf{x}^{\text{o}k} - \varphi^k \mathbf{r}^k. \end{aligned} \quad (\text{A-22})$$

Dabei ist  $\varphi$  die Kontraktionsrate und  $\mathbf{r}$  eine festzulegende Größe. Man kann sie beispielsweise über

$$\mathbf{r} = \mathbf{x}^{\text{o}} - \mathbf{x}^{\text{u}} \quad (\text{A-23})$$

bestimmen, sie für jeden Iterationsschritt neu bestimmen oder aber eine feste Schrittweite festlegen. Wie diese Größe in *OptiY* genau umgesetzt ist, lässt sich nicht ermitteln. Die Kontraktionsrate wird in der Regel jedoch durch

$$\varphi_i^k = \eta + |d_i^k|(\gamma - \eta) \quad (\text{A-24})$$

für jede Designvariable beschrieben [57]. Daher auch der laufende Index  $i$ , der in Gleichung (A-22) noch nicht vorkommt. Darin ist  $\eta$  der Zoomparameter,  $\gamma$  der Kontraktionsparameter und  $d_i^k$  der Bewegungsindikator. Die Werte für Zoom- und Kontraktionsparameter werden

---

standardmäßig auf  $\eta = 0,5$  und  $\gamma = 1$  gesetzt [57]. Der Bewegungsindikator wird mit folgender Gleichung bestimmt:

$$d_i^k = \frac{2(x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)})}{r_i^{(k)}} \quad (\text{A-25})$$

Da das Suchverfahren im Extremfall möglicherweise in eine Endlosschleife fällt, in welcher der Suchbereich immer wieder hin- und hergeschoben wird, ohne sich dabei zu verkleinern, weil sich das virtuelle Optimum immer auf dem Rand des aktuellen Suchbereiches befindet, muss der Suchbereich unabhängig von der Lage des Optimums verkleinert werden. Wie dieser Prozess im Detail in *OptiY* umgesetzt ist, lässt sich nicht ermitteln. Eine Möglichkeit wird in [57] vorgestellt. Dabei erfolgt die Steuerung über die Kontraktionsrate, indem diese zusätzlich über den Bewegungsindikator und einen Oszillationsparameter verringert wird. Da jedoch nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, ob diese Form implementiert ist, wird auf die Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

Nachdem im ersten Schritt alle Approximationsparameter bestimmt wurden und der Suchbereich angepasst wurde, werden neue Stützstellen bestimmt. Hier liegt der Mittelpunkt des Suchraumes im Optimum der ersten Approximation. Die Stützstellen innerhalb des neu definierten Suchbereiches werden ebenfalls wieder mittels *Latin Hypercube Sampling* ermittelt. Nun müssen wieder alle Zielfunktionswerte an den Stützstellen per Simulation bestimmt werden.

Anschließend wird auch von der neuen Approximation wieder das Optimum bestimmt. Wieder wird die Lage des Optimums als Beurteilungskriterium für das weitere Vorgehen verwendet und der nächste Iterationsschritt eingeleitet. Dieses Vorgehen erfolgt solange, bis das Verfahren konvergiert oder ein Abbruchkriterium, z. B. die maximal zulässige Anzahl Optimierungsschritte oder ein zuvor definierter Wert der Zielfunktion, erreicht ist.

Da dem Verfahren eine Approximation mittels Polynom zugrunde liegt, eignet es sich nicht für Optimierungen unstetiger Zielfunktionen. Auch eine unglatte Zielfunktion mit vielen lokalen Extremwerten kann zu einer Konvergenz in einem lokalen Optimum führen. Bei weitestgehend konvexen Zielfunktionen ist es jedoch äußerst effektiv und konvergiert nach nur wenigen Iterationen. Laut [185] ist es für glatte, stetige Zielfunktionen mit einer Anzahl  $n < 20$  Designvariablen äußerst effektiv.

Das eingesetzte Programm *OptiY* steuert die gesamte Optimierungsprozedur. Zu Beginn wird von *OptiY* ein Startdesign erzeugt und ein Simulationsprozess in ANSYS aufgerufen. Das Startdesign wird per Skript von *OptiY* an ANSYS weitergegeben und die im Skript definierte Simulation wird ausgeführt. Anschließend erfolgt eine Verarbeitung der in der Simulation erzeugten Ergebnisse sowohl in *OptiY* und im Falle der Optimierung der Summe der gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnellen zusätzlich auch in Matlab. Matlab gibt die Information



über die berechneten Faktoren an *OptiY* zurück und der Optimierungsprozess wird weiter durchlaufen. Abbildung A-142 zeigt das Blockschaltbild der Optimierungsprozedur zur Optimierung der Summe der mittleren quadratischen Oberflächenschnellen.

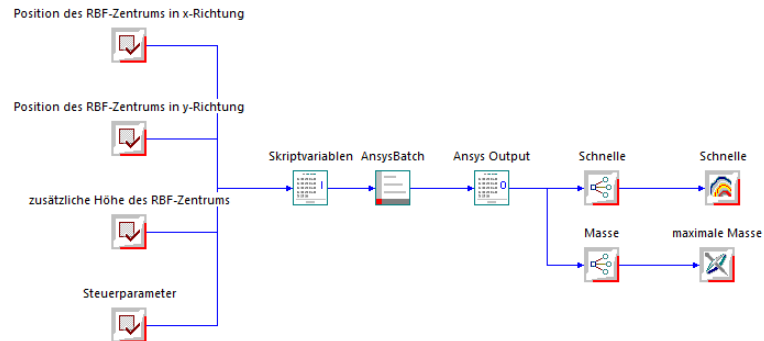


Abbildung A-16: Blockschaltbild der Optimierung der Summe der Schnellen in *OptiY*

In Abbildung A-143 ist das Blockschaltbild der Optimierungsprozedur abgebildet, mit der die Summe der gewichteten mittleren quadratischen Oberflächenschnellen optimiert wird.

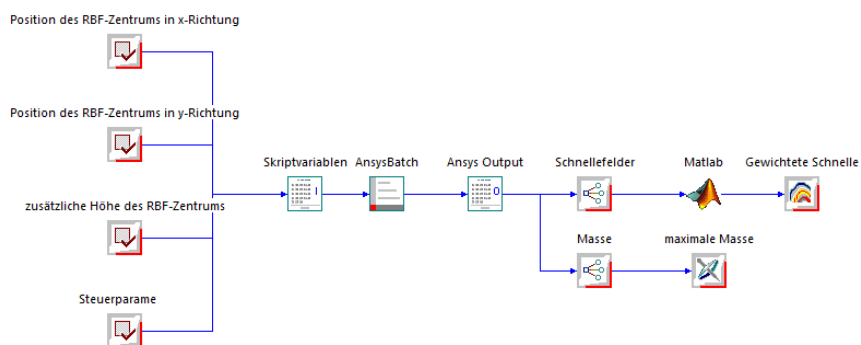


Abbildung A-17: Blockschaltbild der Optimierung der Summe der gewichteten Schnellen in *OptiY*

---

---

## Literaturverzeichnis

---

- [1] Föller, D.: Geräuscharme Maschinenteile, Untersuchung der Anregung von Körperschall in Maschinen und der Möglichkeiten für eine primäre Lärmbekämpfung. In: *Forschungshefte Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.* (1972), Heft 15
- [2] Föller, D.: Geräuscharme Maschinenteile: die Entstehung von Maschinengeräuschen und konstruktive Maßnahmen zu ihrer Verminderung. Abschlussbericht, Frankfurt a. M. 1974 (Vorhaben Nr. 7)
- [3] Kollmann, F.G., Schösser, T.F. und Angert, R.: *Praktische Maschinenakustik*. Berlin u. a.: Springer, 2006
- [4] VDI-Richtlinie 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. 2004
- [5] Hanselka, H., et al.: *Mechatronik, Adaptronik*. In: *Grundwissen des Ingenieurs*. Hrsg.: Hering, E. und Modler, K.-H., Leipzig, München: Hanser Fachbuchverlag, S. 1019-1060, 2007
- [6] Janocha, H.: *Adaptronics and Smart Structures Basics, Materials, Design and Applications*. 2. Auflage, Berlin u. a.: Springer, 2007
- [7] Müller, G. und Möser, M.: *Taschenbuch der technischen Akustik*. 3. überarbeitete Auflage, Berlin u. a.: Springer, 2004
- [8] Lerch, R., Sessler, G.M. und Wolf, D.: *Technische Akustik*. Dordrecht u. a.: Springer, 2009
- [9] Möser, M.: *Technische Akustik*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012
- [10] Schirmer, W.: *Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*. 2. Auflage, Berlin u. a.: Springer, 2006
- [11] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): *Grundlagen zum lärmarmen Konstruieren*. Dortmund, 2007
- [12] Dietz, P. und Gummersbach, F.: *Lärmarm konstruieren XVIII - Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, 2001
- [13] Werner, K.: *Methoden zur wissensbasierten Unterstützung des Konstrukteurs beim Gestalten geräuscharmer Getriebegehäuse*. In: VDI Bericht Nr. 172, Reihe 20, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995
- [14] Kollmann, F.G. und Hirsch, V.: *Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur Geräuschkürzung an Getriebegehäusen*. Abschlussbericht. Darmstadt, 1997 (FVA-Forschungsthema Nr. 201/Ib Heft 514)
- [15] Storm, R.: *Geräuschgerechtes Konstruieren*. In: *Handbuch Konstruktion*. Hrsg.: Rieg, S. R. und Rieg, F., München: Carl Hanser Verlag, 2012

- 
- [16] Koopmann, G.H. und Fahnl, J.B.: *Designing quiet structures: a sound power minimization approach*. San Diego u. a.: Academic Press, 1997
- [17] Zeller, P.: *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag/Springer-Verlag, 2009
- [18] DIN EN ISO 3740. 2017. *Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen - Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen*
- [19] DIN EN ISO 3745. 2017. *Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume*
- [20] DIN EN ISO 3746. 2011. *Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene*
- [21] Cremer, L. und Heckl, M.: *Körperschall*. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1995
- [22] Sennheiser, J.: *Über den Einfluss endlicher Dimensionen auf die Abstrahlung dünner Platten unterhalb der Grenzfrequenz*. Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich, Zürich, 1974
- [23] Maidanik, G.: *Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* (1962) Nr. 34, S. 809-826
- [24] Oppenheimer, C.H. und Dubowsky, S.: *A radiation efficiency for unbaffled plates with experimental validation*. In: *Journal of Sound and Vibration* 199 (1997) Nr. 3, S. 473-489
- [25] Diez, P. und Haje, D.: *Entwicklung lärmarmer Produkte - Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur*. In: IMW - Institutsmitteilung (1998) Nr. 23, S. 121-128
- [26] VDI-Richtlinie 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. 1993
- [27] DIN EN ISO 11688. 1998. *Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer Maschinen und Geräte, Teil 1: Planung*
- [28] DIN EN ISO 11688. 2009. *Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer Maschinen und Geräte, Teil 1: Planung*
- [29] DIN EN ISO 11688. 2001. *Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer Maschinen und Geräte, Teil 2: Einführung in die Physik der Lärminderung durch konstruktive Maßnahmen*
- [30] Seybert, A.F. und Herrin, D.W.: *The prediction of sound radiation from real structures*. In: *Tagungsband 6th International Congress on Sound and Vibration*. Copenhagen, 1999, S. 33-42
- [31] Seybert, A.F. und Wu, T.W.: *Acoustic modeling: boundary element methods*. In: *Encyclopedia of Acoustics*. Hrsg.: Crocker, M.J., New York: John Wiley and Sons, 1997, S. 173-184
-

- 
- [32] Seybert, A.F., Hamilton, D.A. und Hayes, P.A.: *Prediction of radiated noise from machine components using the BEM and the Rayleigh integral*. In: *Noise Control Engineering Journal* 3 (1998) Nr. 46, S. 1-6
- [33] Kollmann, F.G.: *Maschinenakustik: Grundlagen, Meßtechnik, Berechnung, Beeinflussung*. 2. Auflage, Berlin u. a: Springer-Verlag, 2000
- [34] Cremer, L., Heckl, M. und Petersson, B.A.T.: *Structure-borne sound - structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005
- [35] Ihlenburg, F.: *Sound in Vibrating Cabins: Physical Effects, Mathematical Description, Computational Simulation with FEM*. In: *Computational Aspects of Structural Acoustics and Vibration (CISM International Centre for Mechanical Sciences)*. Hrsg.: Sandberg G. und Ohayon R., Wien/New York: Springer, 2009, S. 103-170
- [36] Fritze, D., Marburg, S. und Hardtke, H.-J.: *Estimation of Radiated Sound Power: A Case Study on Common Approximation Methods*. In: *Acta Acustica united with Acustica* 95 (2009) Nr. 5, S. 833-842
- [37] Klaerner, M., Marburg, S. und Kroll, L.: *Simulative measures for structure borne sound radiation of composites*. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics - ICA 2013 Montreal*. Montreal, 2013
- [38] Wiechmann, K. und Hiller, J.: *Evaluation and visualization of equivalent radiated power in  $\mu$ ETA*. In: *4th ANSA &  $\mu$ ETA International Conference*. Thessaloniki, 2011
- [39] Ruber, K. et al.: *Investigations of a tuned vibration absorber with high damping for increasing acoustic panels sound transmission loss in low frequency range*. In: *Tagungsband Acoustics 2011*. Gold Coast, 2011, S. 1-7
- [40] Kim, S. und Singh, R.: *Structure-borne noise measures and their correlation to sound radiation over a broad range of frequencies*. In: *SAE Technical Paper Series 2003-01-1450*. 2003
- [41] Lee, H. und Singh, R.: *Sound radiation from a disk brake rotor using a semi-analytical method*. In: *SAE Technical Paper Series 2003-01-1620*. 2003
- [42] Borgiotti, G.V.: *The power radiated by a vibrating body in an acoustical fluid and its determination from boundary measurements*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 88 (1990) Nr. 4, S. 1884-1893
- [43] Cunefare, K.A.: *The minimum multimodal radiation efficiency of baffled finite beams*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 90 (1991) Nr. 5, S. 2521-2529
- [44] Naghshineh, K., Koopmann, G.H. und Belegundu, A.D.: *Material tailoring of structures to achieve a minimum radiation condition*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 92 (1992) Nr. 2, S. 841-855
- [45] Lee, M.-R. und Singh, R.: *Analytical formulations for annular disk sound radiation using structural modes*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 95 (1994) Nr. 6, S. 3311-3323
-

- 
- [46] Putra, A.: *Sound radiation from perforated plates*. Dissertation, University of Southampton, Southampton, 2008
- [47] Arenas, J.P.: *On the sound radiation from a circular hatchway*. In: *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 15 (2009) Nr. 4, S. 401-407
- [48] Arenas, J.P.: *Matrix method for estimating the sound power radiated from a vibrating plate for noise control engineering applications*. In: *Latin American applied research* 39 (2009) Nr. 4, S. 345-351
- [49] Arenas, J.P. und Albarracín, C.: *Estimation of the active and reactive sound power using hyper-matrices of impedance*. In: *Tagungsband 14th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 14*. Cairns, 2007, S 2705-2712
- [50] Lin, T.R. und Pan, J.: *Sound radiation characteristics of a box-type structure*. In: *Journal of Sound and Vibration* 325 (2009) Nr. 4-5, S. 835-851
- [51] van Engelen, A.J.: *Sound radiation of a baffled plate; theoretical and numerical approach*. In: *Research Report DCT 2009.005 of the Dynamics and Control Group*. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2009
- [52] Kollmann, F.G., Müller, H.W. und Weber, W.: *Akustische Modellgesetze*. Abschlussbericht, Darmstadt, 1985 (Vorhaben Nr. 76)
- [53] Weber, W.: *Akustische Modellgesetze für die Schallleistung von Getriebebaureihen*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1987
- [54] Graf, B.: *Validierung von Methoden zur Berechnung und Reduzierung der Schallabstrahlung von Getriebegehäusen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2007
- [55] Henn, H., Sinambari, G.R. und Fallen, M.: *Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele*. 4. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2008
- [56] Möser, M. und Kropp, M.: *Körperschall*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [57] Harzheim, L.: *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen*. Frankfurt: Verlag Harri Deutsch, 2014
- [58] Kosmol, P.: *Optimierung und Approximation*. 2. Auflage, Berlin/New York: De Gruyter, 2010
- [59] Börs, J.: *Numerical Shape Optimization in Structural Acoustics*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2004
- [60] Börs, J.: *Numerical optimization of the thickness distribution of three-dimensional structures with respect to their structural acoustic properties*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 32 (2006) Nr. 1, S. 12-30
- [61] Ranjbar, M.: *A comparative study on optimization in structural acoustics*. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2011

- 
- [62] Johnson, W.M.: *Structural Acoustic Optimization of a Composite Cylindrical Shell*. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2004
- [63] Dong, J., Choi, K.K. und Kim, N.H.: *Design optimization for structural-acoustic problems using FEA-BEA with adjoint variable method*. In: *Journal of Mechanical Design* 126 (2004) Nr. 3, S. 527-533
- [64] Bregant, L., Miccoli, G. und Seppi, M.: *Construction machinery cab vibro-acoustic analysis and optimization*. In: *Tagungsband NAFEMS 2005 World Congress*. St. Julians, Malta, 2005, S.
- [65] Gil Ho Yoon, J.S.J. und Sigmund, O.: *Topology optimization of acoustic structure interaction problems using a mixed finite element formulation*. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 70 (2007) Nr. 9, S. 1049-1075
- [66] Akl, W. et al.: *Topology optimization of a plate coupled with acoustic cavity*. In: *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009) Nr. 10, S. 2060-2074
- [67] Bagheri, M., Jafari, A.A. und Sadeghifar, M.: *Multi-objective optimization of ring stiffened cylindrical shells using a genetic algorithm*. In: *Journal of Sound and Vibration* 330 (2011) Nr. 3, S. 374-384
- [68] Puri, R.S. und Morrey, D.: *A Krylov-Arnoldi reduced order modelling framework for efficient, fully coupled, structural-acoustic optimization*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 43 (2011) Nr. 4, S. 495-517
- [69] Jianbin, D. and Olhoff, N.: *Topological design of vibrating structures with respect to optimum sound pressure characteristics in a surrounding acoustic medium*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 42 (2010) Nr. 1, S. 43-54.
- [70] Duddeck, F.: *Multidisziplinäre Optimierung im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie*. In: *Tagungsband Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 2.0*. Weimar, 2005
- [71] Jongchan, P. und Wang, S.H.: *Noise reduction for compressors by modes control using topology optimization of eigenvalue*. In: *Journal of Sound and Vibration* 315 (2008) Nr. 4-5, S. 836-848
- [72] Veiz, A. und Will, J.: „Optimierung einer Ölwanne“ Anwendung der Prozesskette ProE - ANSYS Workbench – optiSlang. In: *Tagungsband Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 5.0*. Weimar, 2008
- [73] Lee, J.W. und Kim, Y.Y.: *Optimal distribution of holes in a partition interfacing two cavities for controlling the eigenfrequencies by acoustical topology optimization*. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 198 (2009) Nr. 27-29, S. 2175-2189
- [74] Binxing, W. et al.: *Acoustic topology optimization of a truck cab based on coupled contribution analysis*. In: *Tagungsband International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*. Wuhan, China, 2010
- [75] Halkjaer, S., Sigmund, O. und Jensen, J.S.: *Maximizing band gaps in plate structures*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 32 (2006) Nr. 4, S. 263-275
-



- 
- [76] Jensen, J.S. und Pedersen, N.L.: *On maximal eigenfrequency separation in two-material structures: The 1D and 2D scalar cases*. In: *Journal of Sound and Vibration* 289 (2006) Nr. 4-5, S. 967-986
- [77] Beitelschmidt, M., Stüwing, D. und Quarz, V.: *Akustische Optimierung von Radsätzen*. In: *Tagungsband 37. Schienenfahrzeugtagung 2007*. Graz, 2007, S. 285-289
- [78] Ercan, M.D. und Hulbert, G.M.: *Analysis, design and optimization of structures with integral compliant mechanisms for mid-frequency response*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 39 (2009) Nr. 1, S. 29-45
- [79] Franco, F., Cuneffare, K.A. und Ruzzene, M.: *Structural-acoustic optimization of sandwich panels*. In: *Journal of Vibration and Acoustics* 129 (2006) Nr. 3, S. 330-340
- [80] Zhang, J. und Cheng, G.: *Optimization design of plate on vibration and acoustics based on finite element simulation*. In: *Tagungsband International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*. Sanya, China, 2009, S. 233-236
- [81]. Ranjbar, M., Marburg, S. und Hardtke, H.-J.: *Structural-acoustic optimization of a rectangular plate: A tabu search approach*. In: *Finite Elements in Analysis and Design* 50 (2012), S. 142-146
- [82] Belegundu, A.D., Salagame, R.R. und Koopmann, G.H.: *A general optimization strategy for sound power minimization*. In: *Structural Optimization* 8 (1994) Nr. 2-3, S. 113-119
- [83] Jeon, J.-Y. und Okuma, M.: *Acoustic radiation optimization using the particle swarm optimization algorithm*. In: *JSME International Journal, Series C*, 47 (2005) Nr. 2, S. 560-567
- [84] Denli, H. und Sun, J.Q.: *Structural-acoustic optimization of sandwich structures with cellular cores for minimum sound radiation*. In: *Journal of Sound and Vibration* 301 (2007) Nr. 1-2, S. 93-105
- [85] Denli, H. und Sun, J.Q.: *Structural-acoustic optimization of sandwich cylindrical shells for minimum interior sound transmission*. In: *Journal of Sound and Vibration* 316 (2008) Nr. 1-5, S. 32-49
- [86] Joshi, P. et al.: *Design optimization for minimum sound radiation from point-excited curvilinearly stiffened panel*. In: *Journal of Aircraft* 47 (2010), Nr.4, S. 1100-1110
- [87] Niu, B. et al.: *Discrete material optimization of vibrating laminated composite plates for minimum sound radiation*. In: *International Journal of Solids and Structures* 47 (2010) Nr. 16, S. 2097-2114
- [88] Choi, J.-S. et al.: *Structural optimization of an automobile transmission case to minimize radiation noise using the model reduction technique*. In: *Journal of Mechanical Science and Vibration* 25 (2011) Nr. 5, S. 1247-1255
- [89] Baumann, W.T., Saunders, W.R. und Robertshaw, H.H.: *Active suppression of acoustic radiation from impulsively excited structures*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 90 (1991) Nr. 6, S. 3202-3208
-

- 
- [90] Naghshineh, K. und Koopmann, G.H.: *A design method for achieving weak radiator structures using active vibration control*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 92 (1992) Nr. 2, S. 856-870
- [91] Naghshineh, K. und Koopmann, G.H.: *Active control of sound power using acoustic basis functions as surface velocity filters*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 93 (1993) Nr. 5, S. 2740-2752
- [92] Lee, H.-K. und Park, Y.-S.: *A near-field approach to active control of sound radiation from a fluid-loaded rectangular plate*. In: *Journal of Sound and Vibration* 196 (1996) Nr. 5, S. 579-593
- [93] Cazzolato, B.S. und Hansen, C.H.: *Active control of sound transmission using structural error sensing*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 104 (1998) Nr. 5, S. 2878-2889
- [94] Cazzolato, B.S. und Hansen, C.H.: *Structural radiation mode sensing for active control of sound radiation into enclosed spaces*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 106 (1999) Nr. 6, S. 3732-3735
- [95] Jakob, A. und Möser, M.: *Aktive Minderung der Schallabstrahlung schwingender Platten durch geeignete Beeinflussung der Schwingungsmoden*. In: *Tagungsband 26. Deutsche Jahrestagung Akustik - DAGA 2000*. Oldenburg, 2000, S.476-477
- [96] Jakob, A.: *Aktive Minderung der Schallabstrahlung schwingender Platten*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 1999
- [97] Berkhoff, A.P.: *Identification and control of acoustic radiation modes*. In: *Tagungsband Mechatronics 2002*. Twente, Niederlande, 2002, S. 1397-1406
- [98] Herold, S.: *Simulation des dynamischen und akustischen Verhaltens aktiver Systeme im Zeitbereich*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2003
- [99] Weyer, T. et al.: *Modellierung und Regelung adaptronischer Systeme*. In: *Tagungsband Adaptronic Congress*. Wolfsburg, 2003
- [100] Vogl, B.: *Experimentelle Ermittlung einer vibroakustischen Zielfunktion für die aktive Regelung von Plattenstrukturen*. In: *Zeitschrift für Angewandte Mechanik und Mathematik (ZAMM)* (2002) Nr. 2, S. 298-299
- [101] Vogl, B., Herold, S. und Wahl, F.: *Vibroakustische Sensorik zur aktiven Minimierung der Schallabstrahlung schwingender Strukturen*. In: *Technische Mechanik* 21 (2001) Nr. 3, S. 167-178
- [102] Deffayet, C. und Nelson, P.A.: *Active control of low-frequency harmonic sound radiated by a finite panel*. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 84 (1988) Nr. 6, S. 2192-2199
- [103] Fraanje, R.: *Robust and fast schemes in broadband active noise and vibration control*. Dissertation, University of Twente, Enschede, Niederlande, 2004
-



- 
- [104] Thomaier, M.: *Optimierung der NVH-Eigenschaften von Pkw-Fahrwerkstrukturen mittels Active-Vibration-Control*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2008
- [105] Kozupa, M.M. und Wiciak, J.W.: *Comparison of passive and active methods for minimization of sound radiation by vibrating clamped plate*. In: *ACTA PHYSICA POLONICA A* 119 (2011), S. 1013-1017
- [106] Svensson, J.: *Active Junction Control and Piezoelectric Hybrid Damping for Improving the Acoustic Performance of Lightweight Structures*. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2011
- [107] Greßkowski, J.: *Aktive Reduktion der Schallabstrahlung von schwingenden Strukturen am Beispiel eines A380 Panels*. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Hamburg, 2012
- [108] Janda, O., Stein, L. und Konigorski, U.: *Identification of power transfer matrices for active structural acoustic control*. In: *Tagungsband 20th International Congress on Sound and Vibration ICSV 20*. CD-ROM, Bangkok, Thailand, 2013
- [109] Janda, O.: *Modeling and Control of Sound and Vibration for Smart Structures*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014
- [110] AboElSooud, M.T.: *Vibration control of plates using periodically distributed shunted piezoelectric patches*. Dissertation, University of Maryland, College Park, 2003
- [111] Niederberger, D.: *Smart Damping Materials using Shunt Control*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2005
- [112] Deü, J.-F., Larbi, W. und Ohayon, R.: *Structural-acoustic vibration reduction using piezoelectric shunt techniques: FE formulation and reduced order model*. In: *Tagungsband COMPDYN 2011 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Corfu, Griechenland, 2011
- [113] Nguyen, C.H. und Pietrzko, S.J.: *Vibroacoustic FE analysis of an adaptive plate with PZT actuator/sensor pairs connected to a multiple-mode, electric shunt system*. In: *Finite Elements in Analysis and Design* 43 (2007) Nr. 15, S. 1120-1134
- [114] Giuseppe, R., Joël, P. und Francesco, D.I.: *Control of sound radiation and transmission by a piezoelectric plate with an optimized resistive electrode*. In: *European Journal of Mechanics and Solids* (2010) Nr. 29, S. 859-870
- [115] Larbi, W., Deü, J.-F. und Ohayon, R.: *Finite element formulation of smart composite structure coupled to acoustic fluid*. In: *Tagungsband ICCS16 16th International Conference on Composite Structures*. CD-ROM, Porto, Portugal, 2011
- [116] Larbi, W. und Deü, J.-F.: *Noise and vibration reduction of composite plate coupled with an acoustic cavity. A finite element analysis*. In: *Tagungsband ISCCBE 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. Moskau, Russland, 2012

- 
- [117] Nováková, K., Mokřý, P. und Václavík, J.: *Application of piezoelectric macro-fiber-composite actuators to the suppression of noise transmission through curved glass plates*. In: *IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectric Frequency Control* 59 (2012) Nr. 9, S. 2004-2029
- [118] Heuss, O. et al.: *Application of active and semi-passive control strategies at a double glazing window*. In: *Tagungsband 39. Jahrestagung für Akustik DAGA 2013 und AIA-DAGA 2013 International Conference on Acoustics*. Meran, Italien, 2013, S 2022-2025
- [119] Klauss, T.B., Heuss, O. und Herold, S.: *Reduction of the sound transmission through a double-glazed window by the use of adaptive methods*. In: *Tagungsband 39. Jahrestagung für Akustik DAGA 2013 und AIA-DAGA 2013 International Conference on Acoustics*. Meran, 2013, S 1367-1370
- [120] Heuss, O. et al.: *Design approach for an active double-glazed window*. In: *Tagungsband ISMA 2014 – International Conference on Noise and Vibration Engineering*. Leuven, Belgien, 2014, S 77-92
- [121] Pahl, G., Beitz, W., Schulz, H. J. und Jarecki, U.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen Erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden Und Anwendung*. 6. Auflage, Berlin u. a.; Springer-Verlag, 2005
- [122] Nattermann, R. und Anderl, R.: *The W-Model – Using Systems Engineering for Adaptronics*. In: *Procedia Computer Science* (2013) Nr. 16, S. 937–946
- [123] Nattermann, R.: *Integrierte, virtuelle Entwicklung adaptronischer Systeme*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014
- [124] May, T. und Kohlhammer, J.: *Visual verification of hypotheses*. In: *Tagungsband 4th International Symposium on Visional Computing ISVC 2008*. Las Vegas, USA, 2008, S. 31–42
- [125] Michalski, R.S., Carbonell, J.G. und Mitchell, T.M.: *A theory and methodology of inductive learning*. In: *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*. Hrsg.: Michalski, R.S., San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1983
- [126] Kearns, M. und Vazirani, U.: *An Introduction to Computational Learning Theory*. Cambridge: MIT Press, 1994
- [127] Mitchell, T.: *Machine Learning*. New York: McGraw-Hill, 1997
- [128] Kohavi, R. und Provost, F.: *Glossary of terms: Editorial for the special issue on applications of machine learning and the knowledge discovery process*. In: *Machine Learning* (1998) Nr. 30, S. 271–274
- [129] Cichosz, P.: *Data mining algorithms explained using R*. Chichester: John Wiley & Sons, 2015
- [130] Knobloch, B.: *Der Data-Mining-Ansatz zur Analyse betriebswirtschaftlicher Daten*. In: *Informationssystem-Architekturen* 8 (2001) Nr. 1, S. 59-115
- [131] Bigus, J.: *Data mining with neural networks: solving business problems - from application development to decision support*. New York: McGraw-Hill, 1996

- 
- [132] Knobloch, B. und Weidner, J.: *Eine kritische Betrachtung von Data-Mining-Prozessen - Ablauf, Effizienz und Unterstützungspotenziale*. In: *Data Warehousing 2000. Methoden, Anwendungen, Strategien*. Hrsg.: Jung, R. und Winter, R., Heidelberg: Physica-Verlag, 2000, S. 345-365
- [133] Chapman, P. et al.: *CRISP-DM 1.0 Step-by-step data mining guide*. D.A.D. CRISP-DM-Konsortium, 2000
- [134] Marbán, Ó., Mariscal, G. und Segovia, J.: *A Data Mining & Knowledge Discovery Process Model*. In: *Data Mining and Knowledge Discovery in Real Life Applications*. Hrsg.: Ponce J. und Karahoca A., Wien: InTech, 2009, S. 438-454
- [135] Lundqvist, M., Sandkuhl, K. und Seigerroth, U.: *Modelling Information Demand in an Enterprise Context: Method, Notation and Lessons Learned*. In: *International Journal of Information Systems Modeling and Design 2* (2011) Nr. 3, S. 75 - 95
- [136] Huber, H.: *Wissensmanagement in der Produktentwicklung*. In: *Ringvorlesung 1999/2000: „IT im Engineering“ des SFB 374*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2000
- [137] ISO/IEC 13250. 2002. *Topic Maps*
- [138] Pellegrini, T. und Blumauer, A.: *Semantic Web: Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft*. Berlin u. a: Springer-Verlag, 2006
- [139] Staab, S. und Studer, R.: *Handbook on Ontologies*. Dordrecht u. a: Springer-Verlag, 2011
- [140] Meinel, C. and Sack, H.: *Internetworking: Technische Grundlagen und Anwendungen*. Heidelberg u. a: Springer-Verlag, 2011
- [141] W3C Recommendation: *RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax*. 2014
- [142] Putnik, G.D. und Cunha, M.M.: *Knowledge and Technology Management in Virtual Organizations: Issues, Trends, Opportunities and Solutions*. Hershey London: Idea Group Publishing, 2007
- [143] Andersen, O.A. und Vasilakis, G.: *Building an Ontology of CAD Model Information*. In: *Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization - Applied Mathematics at SINTEF*. Hrsg.: Hasle, G., Lie, K.-A. und Quak, E., Berlin u. a.: Springer, 2007, S. 11-40
- [144] Zocholl, M. und Anderl, R.: *Ontology-based Representation of Time-dependent Uncertainty Information for Parametric Product Data Models*. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Knowledge Management and Information Sharing*. Rom, 2014
- [145] Andrejev, A. und Risch, T.: *Scientific SPARQL: Semantic Web Queries over Scientific Data*. In: *Tagungsband 2012 IEEE 28th International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW)*. Arlington, USA, 2012, S. 5–10
- [146] Andrejev, A., He, X. und Risch, T.: *Scientific data as RDF with Arrays: Tight integration of SciSPARQL queries into MATLAB*. In: *Proceedings of the ISWC 2014 Posters & Demonstrations Track within the 13th International Semantic Web Conference (ISWC 2014)*. Riva del Garda, Italien, 2014, S. 221–224

- 
- [147] Andrejev, A.: *Scientific SPARQL project*. 2013, URL: <http://www.it.uu.se/research/group/udbl/SciSPARQL/> - (abgerufen am 4.4.2018 um 16:43 Uhr)
- [148] Schmidt, M. und Lipson, H.: *Incorporating expert knowledge in evolutionary search: A study of seeding methods*. In: *Tagungsband Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO '09*. Montreal, Kanada, 2009, S. 1091–1098
- [149] Simpson, T.W. et al.: *Metamodels for computer-based engineering design: Survey and recommendations*. In: *Engineering with Computers* 17 (2001) Nr. 2, S. 129-150
- [150] Günther, M. und Velten, K.: *Mathematische Modellbildung und Simulation: Eine Einführung für Wissenschaftler, Ingenieure und Ökonomen*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2014
- [151] Montgomery, D.C.: *Design and Analysis of Experiments*. 7. Auflage, Hoboken: John Wiley & Sons, 2008
- [152] Voss, K. und Süße, H.: *Praktische Bildverarbeitung*. München: Hanser Fachbuchverlag, 1991
- [153] Backhaus, K. et al.: *Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung*. 9. Auflage, Berlin: Springer, 2000
- [154] Walter, J.A.: *Datamining: Methoden integrativer Datenpräsentation*. Habilitationsschrift, Universität Bielefeld, Bielefeld, 2003
- [155] Han, J. und Kamber, M.: *Data Mining: Concepts and Techniques*. Burlington: Morgan Kaufmann, 2000
- [156] Barakat, N. und Bradley, A.P.: *Rule extraction from support vector machines: A review*. In: *Studies in Computational Intelligence*. Hrsg.: Diederich, J., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, S. 178-190
- [157] Fletling, R.: *Methodische Ansätze zur unscharfen Mustererkennung bei Deformationsmessergebnissen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2010
- [158] Shortt, A.E., Naughton, T.J. und Javidi, B.: *Compression of Encrypted Digital Holograms Using Artificial Neural Networks*. In: *Optical Imaging Sensors and Systems for Homeland Security Applications*. Hrsg.: Javidi, B., New York: Springer, 2006, S. 25-45
- [159] Rojas, R.: *Theorie der neuronalen Netze - Eine systematische Einführung*. Berlin u. a.: Springer-Lehrbuch, 1993
- [160] Zurada, J.M.: *Introduction to Artificial Neural Systems*. Mumbai: Jaico Publishing House, 2006
- [161] Kriesel, D.: *Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze*. 2007, URL: <http://www.dkriesel.com> - (abgerufen am 4.4.2018 um 20:30 Uhr)
- [162] Hoffmann, N.: *Kleines Handbuch neuronale Netze: Anwendungsorientiertes Wissen zum Nachschlagen*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 2013
- [163] Lämmel, U. und Cleve, J.: *Lehr- und Übungsbuch Künstliche Intelligenz*. Leipzig: Fachbuchverlag, 2001

- 
- [164] Negnevitsky, M.: *Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems*. Band 1, München: Addison Wesley, 2001
- [165] Kohonen, T.: *Self-organization and associative memory*. Heidelberg: Springer Verlag, 1984
- [166] Lämmel, U. und Cleve, J.: *Künstliche Intelligenz*. 3. Auflage, München: Hanser Verlag, 2008
- [167] *Programmhilfe Matlab R2011b*. MathWorks Inc., Natick, 2011
- [168] Demuth, H.B., Beale, M.H. und Hagan, M.T.: *Neural Network Toolbox User's Guide R2014b*. MathWorks Inc., Natick, 2007
- [169] Kannathal, N. et al.: *Classification of Cardiac Patient States Using Artificial Neural Networks*. In: *Advances in Cardiac Signal Processing*. Hrsg.: Acharya, U.R. et al., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, S. 187-208
- [170] Marquardt, D.: *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*. In: *SIAM Journal on Applied Mathematics* 11 (1963) Nr. 2, S. 431-441
- [171] Hagan, M.T., Demuth, H.B. und Beale, M.H.: *Neural Network Design*. 1996, Boston: PWS Publishing, 1996
- [172] Lloyd, S.P.: *Least squares quantization in PCM*. In: *IEEE Transactions on Information Theory* (1982) Nr. 28, S. 129–137
- [173] Stelzmann, U., Groth, C. und Müller, G.: *FEM für Praktiker 2: Strukturodynamik: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Strukturodynamik – Lösungen mit dem Programm ANSYS Rev. 5.5*. 5. Renningen: Expert-Verlag, 2008
- [174] Visser, R.: *A boundary element approach to acoustic radiation and source identification*. Dissertation, University of Twente, Enschede, Niederlande, 2004
- [175] Andrejev, A. et al.: *Scientific Analysis by Queries in Extended SPARQL over a Scalable e-Science Data Store*. In: *2013 IEEE 9th International Conference on e-Science*. Beijing, China, 2013, S. 98–106
- [176] Jones, W.P. und Furnas, G.W.: *Pictures of Relevance: A Geometric Analysis of Similarity Measures*. In: *Journal of the American Society for Information Science* 38 (1987) Nr. 6, S. 420-442
- [177] Allemang, R.J.: *The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse*. In: *Sound and Vibration Magazine* 8 (2003), S. 14-21
- [178] Moloney, C.R. und Ed Jernigan, M.: *Adaptive image estimation based on multiplicative superposition*. In: *Optical Engineering* 29 (1990) Nr. 5, S. 478-487
- [179] Möser, M.: *Messung der Schallleistung*. In: *Messtechnik der Akustik*. Hrsg.: Möser, M., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, S. 335-364

- 
- [180] Tschesche, J., Bös, J. und Hanselka, H.: *Response surface methodologies for coupling factor exploration: an application example for noise reduction by means of smart structures*. In: *Smart Materials and Structures* 21 (2012) Nr. 6, Paper ID 064007
- [181] DIN EN ISO 9614-1. 2009. *Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen - Teil 1: Messungen an diskreten Punkten*
- [182] Tschesche, J. et al.: *Akustisch optimiertes Leiterbahnlayout aktiver Schalenstrukturen*. In: *Tagungsband DAGA 2011 - 37. Deutsche Jahrestagung für Akustik*. Düsseldorf, 2011, S. 537-538
- [183] Vorländer, M.: *Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik*. In: *Messtechnik der Akustik*. Hrsg.: Möser, M., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, S. 537-575
- [184] Hartung, J.: *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 12. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 1999
- [185] Pham, T.-Q.: *Programmhilfe OptiY Version 3.2*. 2009